



SOLOS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA: CARACTERÍSTICAS, FUNCIONAMENTO E MANEJO

Álvaro Vilela de Resende¹
Sandra Mara Vieira Fontoura²
Emerson Borghi¹
Flavia Cristina dos Santos¹

Claudinei Kappes³
Silvino Guimarães Moreira⁴
Adilson de Oliveira Junior⁵
Ana Luíza Dias Coelho Borin⁶

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fatores que levaram à consolidação do Brasil como grande *player* na produção agropecuária mundial nos últimos anos, destacam-se os investimentos em pesquisa e a crescente adoção, pelos produtores rurais, das tecnologias geradas. Houve grandes avanços no manejo dos solos a partir do conhecimento gerado por instituições de pesquisa e universidades, em interação com entidades de assistência técnica, extensão rural, iniciativa privada e produtores, em diferentes regiões do território nacional. Paralelamente, a evolução em outras especialidades, como melhoramento genético, mecanização, fitotecnia, fitossanidade e irrigação, vem permitindo o desenvolvimento e a exploração, em larga escala, de sistemas de cultivo que potencializam a capacidade do solo de sustentar produtividades cada vez mais elevadas.

Um feito decisivo na trajetória de desenvolvimento agrícola do País foi a superação das limitações químicas dos solos. Tal superação envolveu a caracterização dos fatores limitantes, com a

respectiva geração e aplicação de tecnologias para seu controle. A conversão das terras em ambientes propícios ao adequado desenvolvimento das lavouras se deu pela disseminação das técnicas de correção da acidez do solo e de aplicação de fertilizantes para elevar a disponibilidade de nutrientes. O conjunto dessas técnicas passou a ser referido como manejo para “construção da fertilidade do solo”, que pode ser desdobrado em diversos procedimentos a serem executados a partir da interpretação de resultados da análise de solo, e constituem a base das recomendações presentes em manuais de fertilidade para as diferentes regiões produtoras (RAIJ et al., 1996; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999; CQFS-RS/SC, 2004; SOUSA e LOBATO, 2004; FONTOURA et al., 2015).

Sendo assim, os nossos agricultores geralmente têm bem sedimentada a compreensão de que a utilização de corretivos e fertilizantes é um procedimento fundamental quando se almeja bons rendimentos das culturas. Normalmente, aqueles com maior capacidade de investimento podem tirar mais proveito das boas práticas de manejo. E é justamente nesse segmento mais tecnifi-

Abreviações: Al = alumínio; B = boro; C = carbono; Ca = cálcio; CESB = Comitê Estratégico Soja Brasil; CTC = capacidade de troca de cátions; EUN = eficiência de uso de nutrientes; ILP = integração lavoura-pecuária; K = potássio; Mg = magnésio; MOS = matéria orgânica do solo; N = nitrogênio; P = fósforo; S = enxofre; SPD = sistema plantio direto; V% = saturação por bases.

¹ Engenheiro Agrônomo, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG; email: alvaro.resende@embrapa.br, emerson.borghi@embrapa.br, flavia.santos@embrapa.br

² Engenheira Agrônoma, Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, Guarapuava, PR; email: sandrav@agraria.com.br

³ Engenheiro Agrônomo, Fundação Mato Grosso, Rondonópolis, MT; email: claudineikappes@fundacaomt.com.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de São João Del Rei, Sete Lagoas, MG; email: silvino@ufsj.edu.br

⁵ Engenheiro Agrônomo, Embrapa Soja, Londrina, PR; email: adilson.oliveira@embrapa.br

⁶ Engenheira Agrônoma, Embrapa Algodão, Goiânia, GO; email: ana.borin@embrapa.br

ATENÇÃO! RECADASTRAMENTO!

BIBLIOTECAS/EMPRESAS/INSTITUIÇÕES DE PESQUISA E DE EXTENSÃO - VIDE PÁGINA 32

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE - BRASIL

Avenida Independência, nº 350, Edifício Primus Center, salas 141 e 142 - Fone/Fax: (19) 3433-3254 - CEP 13419-160 - Piracicaba-SP, Brasil
Website: <http://brasil.ipni.net> - E-mail: jmachado@ipni.net - Twitter: @IPNIBrasil - Facebook: <https://www.facebook.com/IPNIBrasil>

INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS

Publicação trimestral gratuita do International Plant Nutrition Institute (IPNI), Programa Brasil. O jornal publica artigos técnico-científicos elaborados pela comunidade científica nacional e internacional visando o manejo responsável dos nutrientes das plantas.

ISSN 2311-5904

COMISSÃO EDITORIAL

Editor

Valter Casarin

Editores Assistentes

Luis Ignácio Prochnow, Eros Francisco, Sílvia Regina Stipp

Gerente de Distribuição

Evandro Luis Lavorenti

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI)

Presidente do Conselho

Norbert Steiner (K+S)

Vice-Presidente do Conselho

Tony Will (CF Industries Holdings, Inc.)

Tesoureiro

Dmitry Osipov (Uralkali)

Presidente

Terry L. Roberts

Vice-Presidente, Coordenador do Grupo da Ásia e África

Kaushik Majumdar

Vice-Presidente, Coordenadora do Grupo do Oeste Europeu/Ásia Central e Oriente Médio

Svetlana Ivanova

Vice-Presidente Senior, Diretor de Pesquisa e Coordenador do Grupo das Américas e Oceania

Paul E. Fixen

PROGRAMA BRASIL

Diretor

Luis Ignácio Prochnow

Diretores Adjuntos

Valter Casarin, Eros Francisco

Publicações

Sílvia Regina Stipp

Analista de Sistemas e Coordenador Administrativo

Evandro Luis Lavorenti

Assistente Administrativa

Elisângela Toledo Lavorenti

Secretária

Jéssica Silva Machado

ASSINATURAS

Assinaturas gratuitas são concedidas mediante aprovação prévia da diretoria. O cadastramento pode ser realizado no site do IPNI: <http://brasil.ipni.net>

Mudanças de endereço podem ser solicitadas por email para: jmachado@ipni.net

Nº 156 DEZEMBRO/2016

CONTEÚDO

Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo

Álvaro Vilela de Resende; Sandra Mara Vieira Fontoura; Emerson Borghi; Flávia Cristina dos Santos; Claudinei Kappes; Silvino Guimarães Moreira; Adilson de Oliveira Junior; Ana Luiza Dias Coelho Borin..... 1

Simpósio do IPNI discute as Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes na Cultura do Café

Sílvia Regina Stipp; Valter Casarin..... 18

Divulgando a Pesquisa..... 30

IPNI em Destaque..... 31

Painel Agrônômico..... 33

Cursos, Simpósios e outros Eventos..... 34

Publicações Recentes..... 35

Ponto de Vista..... 36

NOTA DOS EDITORES

Todos os artigos publicados no *Informações Agronômicas* estão disponíveis em formato pdf no website do IPNI Brasil: <<http://brasil.ipni.net>>

Opiniões e conclusões expressas pelos autores nos artigos não refletem necessariamente as mesmas do IPNI ou dos editores deste jornal.

FOTO DESTAQUE



Equipe do IPNI Brasil, palestrantes e colaboradores da UNIFEOB durante o Simpósio IPNI Brasil sobre Boas Práticas Para Uso Eficiente em Café realizado em Poços de Caldas, MG.

cado do meio rural, que investiu mais fortemente na melhoria dos ambientes de cultivo, onde se constata, com maior frequência, a presença dos “solos de fertilidade construída”, objeto central da abordagem deste artigo.

De forma simplista, pode-se entender que as áreas com solos de fertilidade construída distinguem-se das demais pelo seu histórico de manejo, em que aplicações sucessivas de corretivos e fertilizantes possibilitaram efeitos residuais cumulativos que acabaram por elevar certos atributos químicos da fertilidade (por exemplo: teores de fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn) e bases trocáveis) para níveis interpretados como altos ou mesmo muito altos (Figura 1). Todavia, os casos mais emblemáticos de solos de fertilidade construída geralmente estão associados também ao manejo mais elaborado do sistema de produção, envolvendo plantio direto e uso de plantas de cobertura, o que confere benefícios adicionais ligados principalmente à presença de matéria orgânica no solo (MOS).

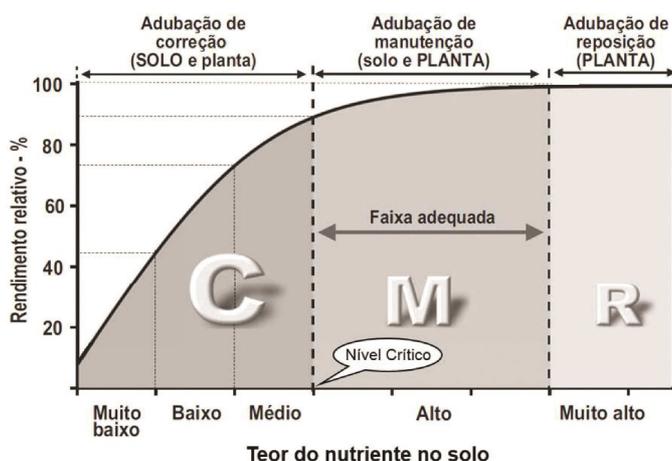


Figura 1. Disponibilidade de nutriente no solo como critério definidor de estratégias de adubação visando a construção (C), manutenção (M) ou reposição (R) da fertilidade. Nessa sequência, a quantidade demandada pela planta torna-se o fator preponderante para o dimensionamento da adubação. O limite superior do intervalo interpretado como “Médio” corresponde ao nível crítico que se busca alcançar na fase de construção da fertilidade.

Fonte: Adaptada de CQFS-RS/SC (2004); Gianello e Wiethölter (2004).

A dinâmica dos nutrientes aplicados em solos de fertilidade construída pode variar quanto aos compartimentos e fluxos na relação solo-planta, diferindo das rotas classicamente consideradas como comportamento padrão, as quais, em geral, foram estabelecidas a partir de estudos desenvolvidos em áreas de incorporação recente ao cultivo e trabalhadas com preparo convencional. Pode-se esperar que os componentes que atuam como “dreno de nutrientes” num primeiro momento (abertura de área) já estejam relativamente saturados nos solos de fertilidade construída, que ao longo do tempo de cultivo passam a expressar o seu caráter “fonte de nutrientes” de forma mais pronunciada. Nessas condições, maior proporção dos nutrientes adicionados via adubação permanece passível de aproveitamento imediato pelas culturas, diminuindo a chance de respostas a incrementos nas doses de fertilizantes.

Não havendo maiores perdas de nutrientes do sistema por erosão, lixiviação ou volatilização, a demanda por novas adubações consistirá essencialmente da reposição do que for exportado nos produtos colhidos. Ou seja, o solo de fertilidade construída passa a atuar como um reservatório de nutrientes, cuja capacidade máxima é dependente da natureza de seus constituintes (quantidade e tipo

de argila, teor de matéria orgânica) e do manejo recebido (práticas que influenciam a capacidade de troca de cátions – CTC), no qual a oscilação do nível de reserva disponível em curto prazo fica mais vinculada ao papel da própria planta como dreno de nutrientes (Figura 1).

Portanto, o correto manejo da adubação envolve lidar com esse reservatório e depende do aprimoramento de diagnósticos da flutuação da fertilidade de acordo com as entradas e saídas de nutrientes ao longo de safras sucessivas. Em virtude da variabilidade natural dos constituintes mineralógicos, químicos, físicos, orgânicos e biológicos dos solos, em interação com o histórico de manejo, essa flutuação da fertilidade é peculiar a cada área de cultivo, o que implica na necessidade de obter informações localmente, para embasar ajustes no dimensionamento da adubação.

Por vezes, o monitoramento e o diagnóstico se revestem de maior complexidade, a exemplo de quando a real disponibilidade de um dado nutriente para as plantas é fortemente afetada por sua presença em frações orgânicas, pela atividade microbiana ou pela reciclagem de resíduos vegetais. Esse aspecto sempre foi evidente no caso do nitrogênio (N), mas atualmente se estende também ao P, enxofre (S) e outros nutrientes em áreas manejadas no sistema plantio direto (SPD). Pelo fato de se mostrarem mais tamponados quanto aos estoques de nutrientes disponíveis, os solos de fertilidade construída constituem ambientes desafiadores para se avançar na filosofia de adubação de sistemas de culturas e na possível revisão de níveis críticos de nutrientes visando o manejo para obtenção de novos tetos de produtividade.

Em função de particularidades da interação com o solo ou da demanda pelas culturas, alguns nutrientes tendem a se acumular mais que outros nos solos de fertilidade construída. Surge aí um desafio gerencial, que é a realização de adubações dimensionadas de forma a garantir o suprimento equilibrado de nutrientes. Por outro lado, surgem também oportunidades para otimizar as adubações e obter maior eficiência de uso de fertilizantes, como a possibilidade de refinamento do manejo priorizando a aplicação de fontes e doses de nutrientes que sejam realmente necessárias a cada situação.

Neste artigo busca-se consolidar o conceito de solos de fertilidade construída, detalhando alguns aspectos de sua caracterização, o papel do plantio direto e as implicações em relação ao potencial de resposta às adubações. Assinala-se a necessidade de aferição e possível revisão de níveis críticos de nutrientes no solo, ou dos valores de referência de fertilidade, para cultivos de elevado potencial produtivo. Diante disso, discutem-se perspectivas de gerenciamento diferenciado do fornecimento de nutrientes nesses ambientes, com ênfase para ganhos de eficiência e rentabilidade em sistemas de produção de culturas anuais.

2. CONCEITO E CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA

No sentido estrito, o conceito de construção da fertilidade diz respeito, sobretudo, à adequação das condições químicas de solos inicialmente ácidos e pobres em nutrientes. Tal adequação ocorre por meio de operações como calagem, gessagem e adubações corretivas com P, K e micronutrientes, realizadas de uma única vez, na abertura de área, ou gradualmente, ao longo dos primeiros cultivos, para alcançar níveis satisfatórios dos atributos químicos, buscando-se associar também práticas que permitam manter ou aumentar os teores de matéria orgânica (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012; LOPES e GUILHERME, 2016).

Dentre os objetivos desses procedimentos destacam-se: i) controle de problemas relacionados à acidez do solo na camada

superficial e em subsuperfície; ii) fornecimento de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) que, além de nutrientes, são importantes para compor quantidades satisfatórias de bases trocáveis no solo; iii) elevação dos teores de P, K e micronutrientes a valores acima dos níveis críticos para o desenvolvimento das culturas; e iv) conservação do teor de matéria orgânica para preservação da CTC, retenção de água no solo, manutenção da atividade microbiana e contribuição no suprimento de N, entre outras funções. O atendimento dessas condições deve constituir um pré-requisito quando se vislumbra o desempenho técnico e economicamente viável das culturas a serem exploradas.

Em um sentido mais amplo, o entendimento é de que solos de fertilidade construída seriam ambientes condicionados para alto potencial produtivo, apresentando elevado grau de tamponamento e resiliência. Nesse contexto, de acordo com Kappes e Zancanaro (2014), os solos de fertilidade construída são aqueles que no início de seu cultivo apresentavam limitações ao desenvolvimento das lavouras, mas, devidamente manejados ao longo do tempo, passaram a exibir condições químicas, físicas e biológicas adequadas para as culturas expressarem seu potencial produtivo.

Sob essa ótica, além das correções químicas para obter disponibilidade de nutrientes acima dos níveis críticos, a etapa de construção envolve, necessariamente, cuidados para a preservação ou melhoria de atributos físicos e biológicos desejáveis no perfil onde ocorrem as interações solo-planta. Ganha importância a visão do correto manejo do sistema como um todo, integrando, conforme

a necessidade, práticas de conservação do solo e da palhada, adubação, plantio direto, diversificação de culturas, uso de plantas de cobertura, manutenção da qualidade física, retenção de água, etc.

De acordo com Bortolon et al. (2016), manejos que permitam altos aportes de material orgânico ao solo proporcionarão a sustentabilidade dos sistemas de produção. Em geral, nas áreas de fertilidade construída e com elevadas produtividades são observadas as seguintes características: (i) altos teores de MOS; (ii) maior capacidade de retenção de água disponível no solo; (iii) solos e práticas de manejo que não afetam negativamente o estabelecimento inicial das culturas; (iv) solos que, mesmo em épocas de veranico, apresentam bom conteúdo de água em profundidade; e (v) solos que apresentam teores de nutrientes adequados, de acordo com as exigências das culturas que compõem o sistema produtivo.

Com os avanços no desenvolvimento agrícola do País, a tendência é que parte cada vez mais significativa das áreas de cultivo de espécies anuais passe a expressar *status* de fertilidade construída, como exemplificado na Figura 2, elaborada a partir da base de dados para agricultura de precisão da empresa CAMPO – Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental. Trata-se de um conjunto de 78.122 amostras de solo, coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade, a cada dois hectares, representando cerca de 160 mil hectares de lavouras no cerrado dos estados de Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Bahia. Pode-se observar que a acidez dos solos está sob controle satisfatório, conforme denotam os baixos teores

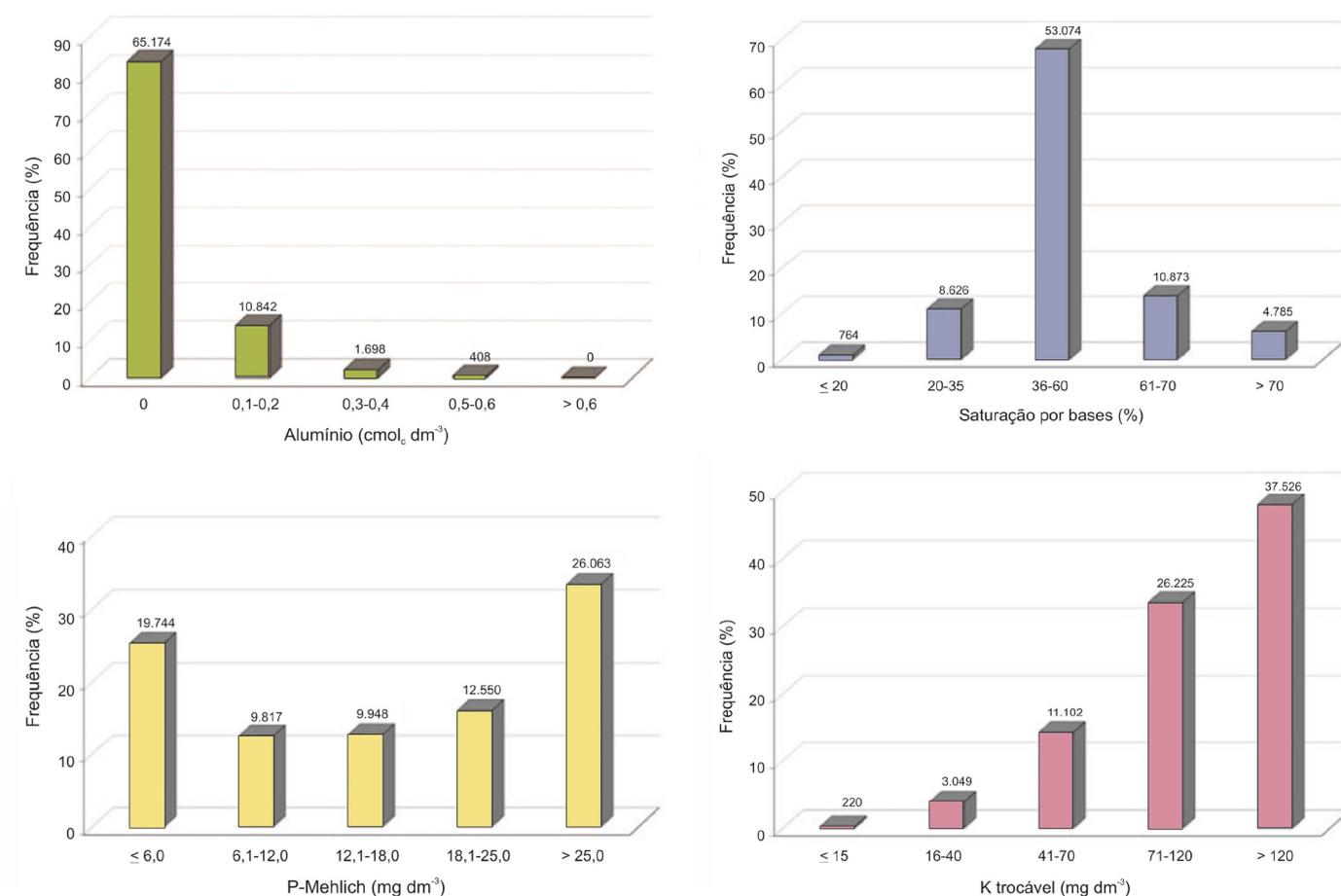


Figura 2. Distribuição de frequência de atributos da fertilidade do solo em 78.122 amostras da camada de 0-20 cm de profundidade, em lavouras no cerrado dos estados de Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Bahia. Significativa proporção apresenta acidez sob controle, além de acúmulo de P e K pelo efeito residual das adubações.

Fonte: CAMPO/Embrapa Milho e Sorgo (não publicado); Resende et al. (2016).

de alumínio trocável e os valores adequados da saturação por bases (30% a 60%) para a maior parte das amostras. Os teores de P e K disponíveis estão elevados em boa parte das amostras, atestando que o residual das adubações realizadas incrementou a fertilidade dos talhões em níveis muito superiores aos que seriam comuns 15 ou 20 anos atrás em lavouras na região do Cerrado. Em muitas áreas, mesmo a camada subsuperficial do solo já se encontra devidamente corrigida, apresentando níveis de acidez que não impedem o aprofundamento radicular das culturas, condição alcançada graças ao uso da gessagem (WILDA et al., 2012).

Quando o foco é a fertilidade química, deve-se considerar dois condicionantes fundamentais. O primeiro diz respeito à Lei de Liebig, a qual enfatiza que o rendimento de uma cultura é limitado pelo nutriente que se encontra em menor disponibilidade no sistema, mesmo que os demais estejam disponíveis em quantidades adequadas. O segundo se refere à Lei de Mitscherlich, a qual afirma que à medida que um solo pobre recebe adições crescentes de um dado nutriente os ganhos de rendimento são inicialmente mais elevados, mas diminuem sucessivamente com o aumento das doses aplicadas até atingir a estabilidade, quando a adição de mais fertilizante pode reduzir a produtividade ou produzir toxicidade (RAIJ, 2011). Considerando esses condicionantes, a adubação deve ser regulada em qualidade e quantidade, observando-se o correto balanceamento entre os diversos nutrientes e a economicidade de aportes adicionais quando no seu fornecimento.

Nesse contexto, o nível crítico de um nutriente indica o valor encontrado na análise de solo acima do qual diminui a probabilidade de resposta em produtividade da cultura à aplicação de insumo ou ao manejo para incrementar o teor do nutriente em questão. Com base no padrão de resposta à disponibilidade de um nutriente, o seu nível crítico costuma ser estabelecido como o teor no solo que proporciona 80 a 90% da maior produção possível naquele ambiente e, teoricamente, estaria associado à produção de máxima eficiência econômica (CANTARUTTI et al., 2007). O valor do nível crítico corresponde ao limite superior do intervalo interpretado como “Médio” na análise do solo (Figura 1), constituindo a meta que se busca superar na fase de construção da fertilidade, podendo variar regionalmente em função dos extratores utilizados em laboratório, dos tipos de solo e das culturas consideradas, além de outros critérios estipulados por diferentes grupos de pesquisa.

Percebe-se que a construção da fertilidade do solo tem passos bem definidos, e que não se trata de um processo estanque no qual implementam-se determinadas ações e chega-se a um resultado desejável estabilizado. Como estão envolvidos vários componen-

tes dinâmicos e diversas alternativas para tomada de decisões de manejo, alcançar e manter as condições ideais não é uma tarefa trivial. Muitas vezes, a avaliação de nutrientes isolados revela valores acima dos níveis críticos, o que, em princípio, indicaria fertilidade construída para aqueles atributos. No entanto, essa situação pode ser passível de otimização, ou melhor equilíbrio, se algum outro fator de produção manejável (de ordem nutricional ou não) ainda não estiver adequado. Para tirar maior proveito das conveniências de se trabalhar em solos de fertilidade construída é preciso investir em qualidade dos diagnósticos, a partir do monitoramento mais frequente do solo e das respostas das culturas, com o devido acompanhamento técnico. Isso possibilita ajustes e reorientações das estratégias de manejo ao longo do tempo, de forma a maximizar o desempenho do sistema de produção.

3. PROCESSOS RELACIONADOS À CONSTRUÇÃO DA FERTILIDADE E MANUTENÇÃO DE AMBIENTES DE ELEVADO POTENCIAL PRODUTIVO

O desenvolvimento das bases conceituais e das recomendações de práticas para a construção da fertilidade do solo teve início no Brasil há mais de 60 anos e recebeu aperfeiçoamentos e adaptações regionais, consolidados nos manuais de interpretação de análise de solo e indicações de uso de corretivos e adubos (RAIJ et al., 1996; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999; CQFS-RS/SC, 2004; SOUSA; LOBATO, 2004; FONTOURA et al., 2015). Desse modo, estão bem estabelecidas e disseminadas as tecnologias envolvendo calagem, gessagem e adubações corretivas com P, K e micronutrientes.

A análise do solo é o instrumento balizador da definição de quanto de cada insumo precisa ser aplicado em uma dada condição. Tendo como referência os níveis críticos dos atributos de fertilidade sugeridos para uma determinada região (Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3) é possível confrontar os resultados da análise e, prosseguindo com consultas a tabelas ou fórmulas indicadas nos manuais, chegar às quantidades de corretivos, condicionadores de solo e fertilizantes mais apropriadas a cada caso.

Os dados da Tabela 1 e da Tabela 2 são indicadores das condições mínimas a serem estabelecidas na etapa de construção da fertilidade, respectivamente, para solos da região do Cerrado e para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Um exemplo de particularização e ajuste desses indicadores em âmbito territorial mais definido consta na Tabela 3, em que os valores propostos foram estabelecidos considerando as condições edafoclimáticas

Tabela 1. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade¹, para o estabelecimento de ambientes de produção intensiva no Cerrado. Níveis críticos correspondem ao maior valor para cada atributo, considerando subdivisões relacionadas à textura/CTC.

Teor de argila	Matéria orgânica	Atributos associados à fertilidade do solo ¹										
		P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Zn	V	
(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	--- (mg dm ⁻³) ---		--- (cmol _c dm ⁻³) ---		----- (mg dm ⁻³) -----						(%)
< 150	8 a 10	18 a 25	30 a 40									
160 a 350	16 a 20	15 a 20		1,5 a 2,4	0,5 a 1,0	5,0 a 9,0	0,3 a 0,5	0,5 a 0,8	2,0 a 5,0	1,1 a 1,6	40 a 50	
360 a 600	24 a 30	8 a 12	70 a 80									
> 600	28 a 35	4 a 6										

¹ Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich 1. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂ e interpretação considerando a média dos valores obtidos em amostras coletadas nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. Teor de B determinado por extração com água quente e teores de Cu, Mn e Zn determinados com o extrator Mehlich 1, com interpretação considerando o pH (água) do solo próximo de 6,0. Para o K, os teores críticos de 40 e 80 mg dm⁻³ referem-se a solos com CTC_{pH 7,0} < 4,0 e > 4,0 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

Fonte: Adaptada de Sousa e Lobato (2004) e Benites et al. (2010).

Tabela 2. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade¹, para o estabelecimento de ambientes de produção intensiva no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Níveis críticos correspondem ao maior valor para cada atributo, considerando subdivisões relacionadas à textura/CTC.

Teor de argila (g kg ⁻¹)	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	Atributos associados à fertilidade do solo ¹									
		P --- (mg dm ⁻³) ---	K --- (mg dm ⁻³) ---	Ca --- (cmol _c dm ⁻³) ---	Mg --- (cmol _c dm ⁻³) ---	S ----- (mg dm ⁻³) -----	B ----- (mg dm ⁻³) -----	Cu ----- (mg dm ⁻³) -----	Mn ----- (mg dm ⁻³) -----	Zn ----- (mg dm ⁻³) -----	V (%)
≤ 200	25	14,1 a 21,0	31 a 45								45
210 a 400	25 a 50	8,1 a 12,0	41 a 60	2,1 a 4,0	0,6 a 1,0	2,0 a 5,0	0,1 a 0,3	0,2 a 0,4	2,5 a 5,0	0,2 a 0,5	45 a 64
410 a 600	> 50	6,1 a 9,0									65 a 80
> 600	-	4,1 a 6,0	61 a 90								80

¹ A profundidade de 0-20 cm corresponde à camada diagnóstica na fase de estabelecimento do sistema plantio direto. No sistema consolidado, o monitoramento deve, preferencialmente, basear-se em amostras estratificadas de 0-10 cm e 10-20 cm. Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich 1. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com água quente e teores de Cu, Mn e Zn determinados com extrator Mehlich 1. Para o K, os teores críticos de 45, 60 e 90 mg dm⁻³ referem-se a solos com CTC_{pH 7,0} < 5,0, entre 5,1 e 15,0 e > 15,0 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

Fonte: Adaptada de CQFS-RS/SC (2004).

Tabela 3. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, para o estabelecimento de ambientes de produção intensiva na região centro-sul do Paraná. Níveis críticos correspondem ao maior valor para cada atributo.

Teor de argila (g kg ⁻¹)	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	Atributos associados à fertilidade do solo									
		P --- (mg dm ⁻³) ---	K --- (mg dm ⁻³) ---	Ca --- (cmol _c dm ⁻³) ---	Mg --- (cmol _c dm ⁻³) ---	S ----- (mg dm ⁻³) -----	B ----- (mg dm ⁻³) -----	Cu ----- (mg dm ⁻³) -----	Mn ----- (mg dm ⁻³) -----	Zn ----- (mg dm ⁻³) -----	V (%)
350 a 600	41 a 60	4 a 8	47 a 90	2,0 a 4,0	0,5 a 1,0	2,0 a 5,0	0,1 a 0,3	0,2 a 0,4	2,5 a 5,0	0,2 a 0,5	50 a 70

¹ Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich 1. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com água quente e teores de Cu, Mn e Zn determinados com o extrator Mehlich 1.

Fonte: Adaptada de Fontoura et al. (2015) e CQFS-RS/SC (2004).

e os sistemas de cultivo característicos da área de atuação da Cooperativa Agrária, no centro-sul do Paraná. De fato, o uso de critérios regionalizados mais específicos, de preferência validados localmente, é um requisito importante quando se busca aprimorar a gestão de solos de fertilidade construída.

Geralmente, o alcance dos níveis críticos sugeridos na literatura é necessário, mas não suficiente, para garantir elevadas produtividades de forma continuada, as quais apenas serão viabilizadas por meio das adubações de manutenção no decorrer das safras. Outro aspecto importante é que os valores críticos não representam patamares finais de fertilidade que devam ser rigorosamente observados. Dependendo do solo, das condições ambientais, do sistema de produção explorado, das produtividades almeçadas e da economicidade, as metas de *status* de fertilidade a serem mantidas podem ser reajustadas e ficar bem acima dos níveis críticos clássicos. Nesse caso, deve-se redobrar a atenção no equilíbrio do que for reajustado em relação a outros atributos do solo, porque muitas das vezes não há maior vantagem em se incrementar um fator de forma isolada.

Em qualquer sistema de produção, a calagem é prática essencial para correção da acidez do solo e os calcários são os insumos mais comumente utilizados para essa finalidade. A reação do calcário e, conseqüentemente, os benefícios da calagem ocorrem no perfil de acordo com a profundidade de incorporação, tendo em vista a baixa mobilidade no solo dos constituintes derivados de carbonatos de cálcio e de magnésio. No Brasil, tem-se diferentes métodos de cálculo da necessidade de calagem, mas a porcentagem de saturação por bases (V%), mensurada em algum momento após a aplicação do calcário, é frequentemente considerada como indicadora do grau de correção da acidez obtido com o procedimento.

No caso do SPD, em que não deve haver revolvimento do solo, as aplicações de materiais corretivos apresentam efeitos claramente detectáveis na camada mais superficial, até 5 cm. A partir daí, forma-se um gradiente de intensidade decrescente, em que a frente de correção da acidez se aprofunda lentamente, sob efeito da dosagem utilizada e do tempo decorrido da aplicação (CAIRES, 2013).

A situação é diferente no caso de solos arenosos, onde a ação do calcário aplicado superficialmente atinge profundidades maiores, podendo seu efeito alcalinizante ser verificado a até 60 cm no perfil do solo (GATIBONI, 2003). Isso decorre essencialmente das características físicas dos solos arenosos, que apresentam maior macroporosidade. O arraste de partículas finas de calcário pela água é facilitado pelos macroporos ou por bioporos originários da decomposição do sistema radicular das plantas. Além disso, como estes solos possuem baixo poder tampão, a acidez pode ser corrigida com menores doses de calcário, comparativamente aos solos argilosos, sendo então mais importante monitorar a disponibilidade de Ca e Mg, para que os seus teores absolutos estejam satisfatórios.

O ideal é que um solo de fertilidade construída receba inicialmente, antes do estabelecimento do plantio direto, incorporação de calcário na quantidade necessária para adequar o estado de acidez e ainda criar um efeito residual que faça perdurar, pelo máximo de tempo possível, condições favoráveis ao desenvolvimento radicular das culturas na camada até 20 ou 30 cm de profundidade. A partir de então, aplicações superficiais periódicas possibilitarão manter um fluxo, gradativo, porém contínuo, de reabastecimento do perfil com as bases Ca e Mg e de compensação dos processos de reacificação do solo que ocorrerão com o tempo.

O aprofundamento radicular no perfil costuma ser prejudicado por fatores relacionados à acidez em camadas subsuperficiais do solo,

mesmo em áreas que já tenham recebido alguma incorporação de calcário. É comum que baixos teores de Ca e presença de alumínio (Al) em saturação acima de 20% na CTC efetiva sejam fatores limitantes em profundidade, sobretudo nos solos mais intemperizados (RAIJ, 1988; SOUSA; LOBATO; REIN, 2005). Nesse caso, a tecnologia de gessagem permite condicionar porções inferiores do perfil, onde o efeito da calagem não chega. Numa explicação simplificada, pode-se considerar que as características inerentes à molécula do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) possibilitam uma dinâmica peculiar, em que há mobilização vertical de CaSO_4 para estratos abaixo da camada arável. Aí ocorre a dissociação dessa molécula e o sulfato pode ligar-se ao Al, reduzindo sua atividade e toxidez às plantas, enquanto o Ca liberado diminui a saturação por Al ao mesmo tempo em que estimula o crescimento do sistema radicular.

Desse modo, um dos benefícios mais significativos da gessagem é o de permitir o acesso de raízes a zonas mais profundas do solo, e consequente aproveitamento de água e nutrientes disponíveis, fato este que assume especial relevância para o desempenho das culturas quando as plantas ficam sujeitas a períodos de déficit hídrico (veranicos), principalmente em solos arenosos e cultivos na modalidade safrinha. Essa ampliação do ambiente de crescimento radicular também resulta em incorporação de carbono (C) no perfil, com todas as melhorias em atributos químicos, físicos e biológicos associadas à maior presença de MOS (VEZZANI et al., 2008; SÁ et al., 2008; 2010; BABUJIA et al., 2010; LOPES et al., 2013; PEREIRA et al., 2016).

Mediante diagnósticos apropriados, as práticas de calagem e gessagem se tornaram de uso corrente na agricultura tecnificada, não somente na abertura de área, mas como parte do manejo periódico da acidez em talhões de fertilidade construída. Parece, inclusive, haver algum efeito sinérgico decorrente da aplicação conjunta de calcário e gesso, que aumentaria a mobilização de seus constituintes para camadas inferiores. Especificamente nesse aspecto, resultados experimentais em Latossolo Vermelho argiloso no Paraná (CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001) forneceram indicativos de que, ao invés do uso isolado, a conjugação da calagem com a gessagem potencializa o condicionamento subsuperficial do perfil, ao promover maior incremento de Ca e consequente redução da saturação por Al, além de uma sutil elevação do pH em profundidade. Adicionalmente, essa combinação de práticas corretivas da acidez estimula a atividade biológica e promove maior acumulação de carbono orgânico no SPD (INAGAKI et al., 2016).

Para alcançar a condição de fertilidade construída, além do controle da acidez, os solos devem ter recebido adubações corretivas com P, K e micronutrientes, quando necessário. As alternativas e procedimentos para essas operações se encontram bem delineados nos manuais de fertilidade do solo e adubação, cujo conteúdo é repassado de forma bastante efetiva durante a formação dos profissionais de ciências agrárias. Não obstante, as adubações corretivas podem não surtir o efeito desejado quando realizadas sem a devida incorporação, o que compromete a qualidade e a longevidade do SPD. No anseio de ganhar tempo, alguns agricultores ainda incorrem nesse erro e logo adiante se deparam com o insucesso na adoção do SPD.

Um perfil de fertilidade construída em toda a camada de 0 a 20 cm é a premissa principal a ser observada quando se pretende estabelecer um SPD de qualidade, para alto potencial produtivo. Especificamente, o P precisa ser manejado de forma a assegurar disponibilidade satisfatória nessa camada, o que não se consegue somente com aplicações em superfície sem incorporação, devido à mobilidade muito baixa, característica desse nutriente (SOUSA; LOBATO, 2004; NUNES et al., 2011). Negligenciar esse fato certamente aumenta o risco quando as lavouras se desenvolvem sob a

influência de veranicos, além de prejudicar a expressão do potencial genético de cultivares de alta produtividade (RESENDE, 2011; OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; FONTOURA et al., 2015; ZANCANARO et al., 2015a).

Em seqüência às adubações corretivas, trabalha-se com as adubações de manutenção a cada cultivo, e é nesse componente do manejo da fertilidade que surgem mais dúvidas quanto ao dimensionamento. Ao lidar com as necessidades nutricionais das culturas, que reagem a fatores bióticos e abióticos do meio em interações inconstantes e de difícil previsibilidade, as incertezas passam a interferir nos critérios para a tomada de decisão. Em última instância, as produtividades resultantes de muitos condicionantes e suas interações é que vão delimitar as reais exigências de adubação ao longo do tempo. A possibilidade de perdas de nutrientes do sistema, em maior ou menor proporção, acrescenta mais complexidade ao planejamento. Por isso, mesmo quando se procura seguir os passos definidos na literatura para as escolhas relacionadas às adubações de manutenção, frequentemente são detectadas falhas em termos quantitativos e qualitativos, com excessos, carências e desbalanços entre nutrientes. De todo modo, pode-se esperar a ocorrência de efeito residual das sucessivas aplicações de fertilizantes nas adubações de manutenção, o que acaba por compor e ampliar os estoques de nutrientes no ambiente de cultivo (Figura 2), em magnitude variável, conforme as características do nutriente, do solo e do manejo das lavouras.

Nas áreas de produção de grãos com maior investimento tecnológico e uso mais intensivo de adubos e corretivos, geralmente verifica-se que nutrientes como P, Ca, Mg e Zn apresentam tempo de residência mais prolongado e tendem a se acumular no sistema, com nítido reflexo em elevação dos teores disponíveis na análise de solo. Comportamento intermediário se percebe no caso do K, S e Cu, cujas disponibilidades podem oscilar de forma um pouco mais abrupta, a depender do balanço entre as quantidades fornecidas e a demanda pelas culturas. Já para N e B, sabe-se que a permanência em condições de aproveitamento pelas plantas tende a ser mais efêmera, caracterizando baixo efeito residual, mesmo com adubações frequentes e doses relativamente elevadas.

Pelo exposto, conclui-se que a condição de fertilidade construída não é estática e caracteriza-se pela oscilação temporal dos níveis de acidez e de disponibilidade de nutrientes. Cabe ressaltar que diferentes ambientes de cultivo podem ser mais ou menos estáveis, a exemplo, respectivamente, de solos argilosos e arenosos, que são muito contrastantes quanto ao tamponamento de atributos da fertilidade. Independentemente da textura, o poder tampão dos solos está sujeito também à forte influência de seus constituintes orgânicos, sendo diretamente proporcional ao conteúdo de matéria orgânica (SILVA et al., 1994; SÁ et al., 2010; CANELLAS et al., 2008), cujo efeito é ainda mais proeminente no caso dos ambientes muito intemperizados das zonas tropicais em que as argilas são de baixa atividade.

Práticas agrícolas que favoreçam a conservação ou aumento da MOS assumem, assim, papel de alta relevância, tornando a adoção do SPD um requisito fundamental para a estabilidade e incremento do potencial produtivo dos solos de fertilidade construída, como se discutirá adiante. Sob esse ponto de vista, a condução do SPD com diversificação de espécies e elevado aporte de palhada deve constituir a etapa mais avançada a integrar o conjunto de técnicas preconizado para a construção da fertilidade (Figura 3).

O esquema apresentado na Figura 3 sintetiza o processo de diagnóstico das necessidades do sistema, que deve ser realizado com alguma frequência nas áreas de produção, para nortear/reorientar a tomada de decisão quanto às principais práticas de manejo, buscando estabelecer e manter ambientes de alto potencial

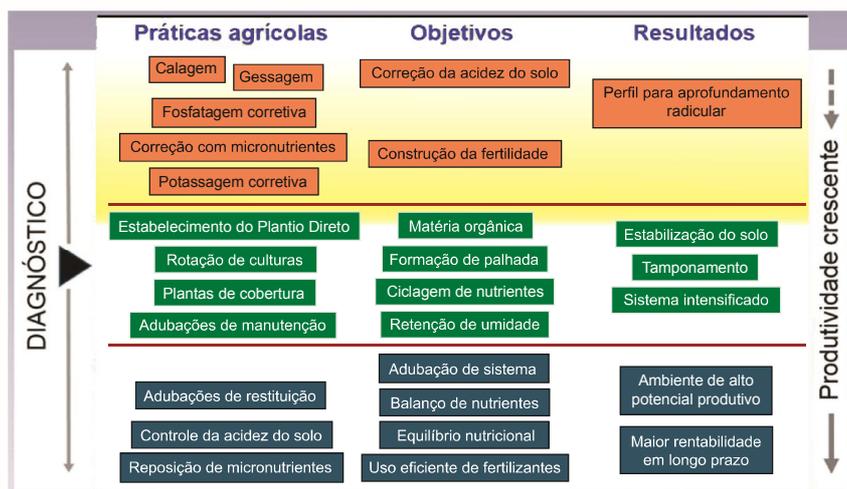


Figura 3. Diagrama esquemático relacionado ao diagnóstico e priorização de práticas agrícolas para o estabelecimento e manutenção de ambientes de alto potencial produtivo.

Crédito: Álvaro Resende.

produtivo. O gradiente de fundo da cor laranja até a azul posiciona as etapas a serem galgadas para níveis crescentes de produtividade e sustentabilidade, e representa uma hierarquização das situações encontradas nos diagnósticos, a qual leva à priorização das operações a serem realizadas pelo produtor. Por exemplo, se o monitoramento do talhão traz um diagnóstico que aponta a necessidade de determinada prática situada na região laranja do diagrama, significa que aquela prática é preferencial em relação a outras situadas nas regiões verde e azul. Sem a realização de tal prática prioritária, haverá maior restrição ao desempenho das culturas, diminuindo, por consequência, o retorno a outros investimentos no manejo do sistema.

Os solos em ambientes e sistemas de produção variados possuem distinta capacidade de estoque de nutrientes e pode ser interessante manter essa capacidade elevada quando se almeja incrementos em produtividade. Ou seja, em determinadas situações, pode ser possível e compensador trabalhar com nível mais elevado de fertilidade. Nesse sentido, é conveniente buscar meios de aferir como o ambiente de cultivo se comporta quanto à aptidão para estocagem e ciclagem de nutrientes. A maneira mais simples de conhecer o potencial de retenção ou de perda de nutrientes é por meio do monitoramento da oscilação de disponibilidade na análise do solo ao longo do tempo, buscando-se associar tal oscilação a adições e remoções que ocorrem em safras sucessivas (Figura 4). Se o teor disponível no solo aumenta com o tempo, em consonância com os aportes de um dado nutriente nas adubações, tem-se o indicativo de que aquele ambiente pode funcionar como um bom reservatório e suportar um *status* de fertilidade mais elevado. Do contrário, constata-se que já foi atingido o limite de retenção daquele nutriente e que novas aplicações deverão ser vinculadas às exigências das culturas, devendo-se, eventualmente, parcelar em mais vezes a adubação.

A despeito da gama de situações existentes nas regiões produtoras, é possível estabelecer as condições que contribuem para reduzir as perdas de nutrientes das áreas de cultivo. Serão ambientes conservadores de nutrientes, com maior armazenamento ou menor declínio, os solos que associem as seguintes características: relevo plano; textura argilosa; porosidade que permita boa infiltração de água, mas sem drenagem excessiva; teor de matéria orgânica e CTC mais elevados; perfil sem acidez e com boa disponibilidade de nutrientes. Além disso, quanto mais intensivamente vegetado,

com plantas vivas por mais tempo ao longo do ano e presença de espécies com raízes profundas, maior será a capacidade do sistema captar os nutrientes derivados das adubações e mantê-los em circulação, minimizando a probabilidade de perdas ou indisponibilização. Combinadas essas condições, e sendo os processos erosivos devidamente controlados, se estabelecem fluxos de “nutrientes circulantes no sistema”, não havendo remoção significativa, a não ser pela exportação nos produtos colhidos.

A Figura 5 ilustra as condições desejáveis para melhor aproveitamento, retenção e ciclagem de nutrientes nos ambientes de produção de grãos. A base é o perfil com fertilidade construída, que estimula o desenvolvimento abundante de raízes em profundidade no solo, permitindo alcançar nutrientes e água disponíveis em subsuperfície. Nesse aspecto, além de Ca, as zonas com maior disponibilidade de P favorecem a proliferação de raízes (COSTA et al., 2009; SOUSA et al.,

2013). Associada ao SPD, a adoção de práticas de intensificação ecológica, de acordo com a oferta ambiental e os sistemas de produção regionais, deverá preferencialmente envolver diversidade de espécies (gramíneas e leguminosas) e de arquitetura radicular (fasciculada e pivotante). Plantas de sistema radicular robusto (braquiárias, milheto) contribuem de maneira conveniente para mobilização ascendente e descendente de nutrientes, recuperando aqueles eventualmente deslocados para zonas inferiores [K, S, boro (B)] e auxiliando na incorporação de outros menos móveis (P, Ca), além de aportar carbono e agregar os benefícios da MOS em camadas mais profundas.



Figura 4. Representação esquemática do processo de monitoramento e manejo de solos de fertilidade construída, considerando perdas minimizadas. O balanço de entradas (A) e saídas (B) de nutrientes e sua influência sobre o estado de fertilidade do solo (C) fornece subsídios para ajustes no dimensionamento das adubações de manutenção (D) ao longo do tempo.

Crédito: Álvaro Resende.

Um sistema assim conduzido preserva as propriedades físicas desejáveis, incluindo a infiltração e retenção de água, e promove a diversidade e atividade microbiana. Os processos de ciclagem são potencializados, originando um estoque de nutrientes circulantes na biomassa (plantas vivas, palhada, matéria orgânica, microrganismos), que, desse modo, ficam mais protegidos dos fenômenos de indisponibilização e de perdas. Como resultado final, tem-se a manutenção de condições favoráveis à obtenção de altas produtividades e com maior eficiência na utilização de fertilizantes e de água.

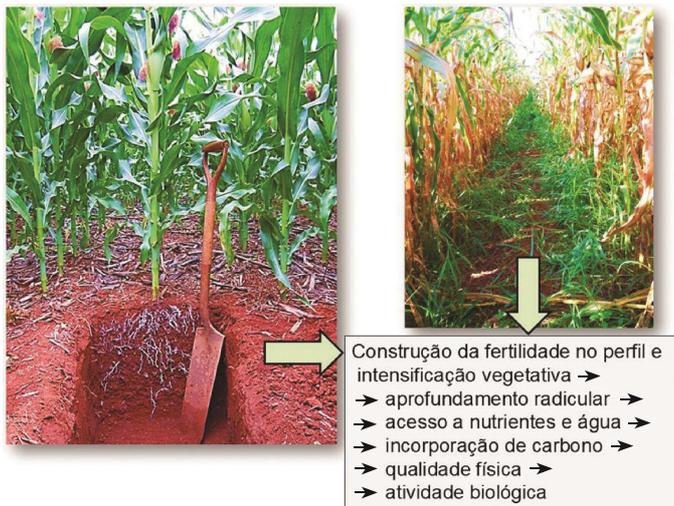


Figura 5. Perfil com fertilidade construída (esquerda) e intensificação ecológica com braquiária consorciada (direita) em pleno desenvolvimento na maturação do milho. Exemplos de condições para melhor aproveitamento de nutrientes e água.

Crédito: Álvaro Resende.

4. PAPEL DO PLANTIO DIRETO E DA INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA NA ESTABILIZAÇÃO DA FERTILIDADE CONSTRUÍDA

Os conceitos de tamponamento, resiliência e estabilidade dos ambientes de produção de culturas anuais são intrinsecamente relacionados ao SPD bem implantado e conduzido, graças especialmente ao seu papel na conservação da MOS, como pode ser observado na Figura 6. No caso em questão, a estabilidade produtiva do sistema foi mantida quando houve aporte de palhada por meio da rotação de culturas adotada ao longo do tempo, enquanto, sob monocultivo, é perceptível a ausência de palha em superfície, resultando em menores níveis de MOS e atividade biológica, o que culmina em visível perda de vigor da soja. A análise de rotina para MOS, na camada de 0 a 10 cm, indicou teores de 32 e 40 g kg⁻¹ nas parcelas com monocultivo e rotação de culturas, respectivamente.



Figura 6. Aspecto visual do desenvolvimento de uma cultivar de soja superprecoce, após sete anos de monocultivo sem revolvimento do solo (à esquerda) e com rotação de culturas (à direita) envolvendo crotalária e milho safrinha + braquiária, em ambiente de Cerrado no Mato Grosso.

Crédito: Claudinei Kappes (Fundação MT).

A implementação do SPD de longa duração, com combinação mais diversificada de culturas e plantas de cobertura, caracterizando a intensificação ecológica do sistema de produção, favorece maior produção de biomassa (palhada) e fortalece justamente as qualidades de tamponamento, resiliência e estabilidade nos solos de fertilidade construída. Alcançar tal condição traz reflexos muito positivos na estruturação e funcionamento do sistema solo-água-microrganismo-planta, sobretudo ao amenizar os impactos de períodos de estresses bióticos e abióticos ou mesmo de falhas no manejo da adubação e das culturas, o que tende a gerar ganho diferencial na produtividade acumulada em longo prazo.

Do contrário, os cultivos sucessivos (soja/milho safrinha, soja/trigo) e monocultivos provocam a degradação física, química e biológica do solo, além de acentuar a vulnerabilidade da propriedade agrícola às instabilidades econômicas e climáticas. Uma particularidade do momento diz respeito à incidência de nematoides fitopatogênicos de diversas espécies em novas áreas de cultivo, cujos prejuízos aos produtores têm impulsionado o uso de rotação de culturas ou consórcios com plantas não hospedeiras (crotalárias), visando à redução das populações desses patógenos no solo.

A diversidade de combinações de sistemas em rotação, sucessão e consórcio amplia as opções de usos múltiplos das espécies cultivadas. No sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) na região do Cerrado, por exemplo, o consórcio de culturas produtoras de grãos com forrageiras tropicais tem como finalidade o fornecimento de alimento para a exploração pecuária a partir do final do verão até o início da primavera, e, posteriormente, a formação de palhada para o cultivo da espécie produtora de grãos em SPD (BORGHI et al., 2013). Forrageiras dos gêneros *Urochloa* (Syn. *Brachiaria*) e *Megathirsus* (Syn. *Panicum*) são bastante apropriadas para a ILP em áreas com restrição de chuvas, pois possuem sistema radicular profundo e maior tolerância à deficiência hídrica, desenvolvendo-se em situações nas quais a maioria das espécies de safrinha não resistiria. Em virtude das diversas vantagens já percebidas pelos produtores, em muitas áreas, a inclusão dessas gramíneas em consórcios com culturas produtoras de grãos (milho e soja) vem sendo feita não para fins de ILP, mas com o propósito de produção de palhada para o SPD e, em alguns casos, também para auxiliar no controle de determinados patógenos de solo (mofo branco) e plantas daninhas (buva).

Apesar da dificuldade de se incrementar os teores de MOS, mormente nas regiões tropicais (SÁ et al., 2015; CRUSCIOL et al., 2015; CORBEELS et al., 2016), a possibilidade de qualquer acréscimo ou, pelo menos, a manutenção dos teores originais de matéria orgânica representa substancial ampliação da capacidade de reserva e suprimento de nutrientes pelo solo. Esses efeitos decorrem da contribuição proporcionalmente mais elevada da MOS para a CTC dos solos tropicais, principalmente os arenosos (SILVA et al., 1994), e do fluxo de disponibilização de nutrientes advindo de processos de ciclagem pela atividade microbiana nos compartimentos orgânicos. Como resultado, solos com maior conteúdo de carbono orgânico estão vinculados a níveis mais elevados de fertilidade, de biomassa microbiana e de produtividade de grãos (SÁ et al., 2009; LOPES et al., 2013; SÁ et al., 2015). Tais aspectos são notórios nos solos arenosos, por sua baixa CTC devido aos escassos conteúdos de argila e de matéria orgânica, onde a exploração agrícola sustentável só tem chance de se viabilizar com a adoção do SPD e de outras práticas conservacionistas.

Diferentes modalidades de SPD podem resultar em conteúdos de constituintes orgânicos distintos em relação à quantidade e qualidade, o que também depende das condições ambientais, como altitude, pluviosidade e temperatura. De todo modo, sabe-se que teores mais altos de MOS em áreas sob SPD são associados a maiores aportes anuais de resíduos fontes de carbono (SÁ et al., 2015), preferencialmente acima de 10 t ha⁻¹ de matéria seca ao ano. Mas também dependem da existência de ambientes enriquecidos com Ca e P (BRIEDIS et al., 2016; INAGAKI et al., 2016), e em especial com N oriundo de sistemas com maior participação de espécies leguminosas como plantas de cobertura (HUNGRIA et al., 2009; BABUJIA et al., 2010; BODDEY et al., 2010; ZOTARELLI et al., 2012; URQUIAGA et al., 2014). Nesse contexto, depreende-se que os solos de fertilidade construída em SPD não somente são ambientes mais propícios à pujante produção de biomassa vegetal, mas efetivamente dispõem dos fatores que fomentam os mecanismos de conversão de resíduos vegetais em estoque de carbono orgânico mais estável no perfil, assumindo, assim, destacado potencial também para a mitigação das emissões de CO₂.

A garantia das premissas do SPD, de mínimo revolvimento do solo, rotação de culturas e produção de palhada para cobertura permanente, tem mostrado ser a melhor saída para solucionar limitações de ordem física nos solos. Altas temperaturas na superfície, compactação e baixa infiltração/retenção de água, são frequentemente associadas a perdas de estande e produtividade em lavouras bem adubadas (ZANCANARO et al., 2015b). A conformidade na condução do SPD ameniza esses problemas e diminui a necessidade/periodicidade de intervenções drásticas para rompimento de barreiras físicas, como operações de escarificação e subsolagem, que são apenas paliativos.

A bioporosidade criada pela atividade radicular e mesofauna do solo, e a possibilidade das raízes de algumas plantas penetrarem em camadas mais compactadas, têm motivado a preconização de sistemas de produção como a rotação e o consórcio de culturas em SPD (ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2010). Benefícios importantes têm sido observados na estruturação do solo, em médio e longo prazos, com a utilização de plantas de cobertura com elevado potencial de fixação de carbono e que possuem sistema radicular volumoso e agressivo (CRUSCIOL et al., 2010), com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, criando poros por onde as raízes da cultura seguinte possam crescer em volume e profundidade. Calonego, Borghi e Crusciol (2011) avaliaram as alterações nos atributos físico-hídricos do solo por cultivos de milho solteiro e consorciado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Concluíram que o cultivo solteiro de milho no verão é suficiente para melhorar as características físicas e estruturais do solo na camada de 0 a 20 cm, porém, o consórcio com braquiária por dois anos consecutivos estendeu tais melhorias à camada de 20 a 40 cm, com redução da resistência mecânica à penetração (Figura 7) e aumento da densidade crítica, permitindo maior capacidade de retenção de água no solo.

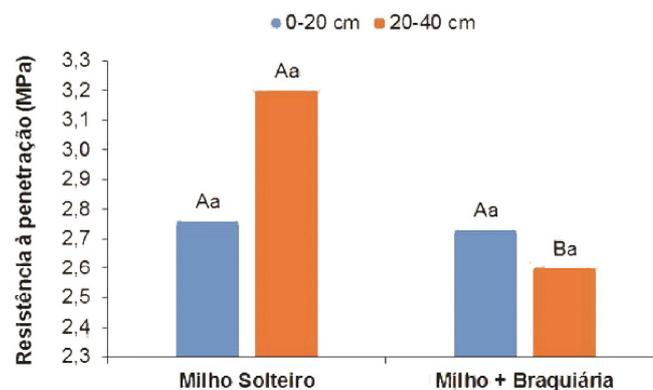


Figura 7. Resistência mecânica à penetração do solo com umidade na capacidade de campo, em sistemas de cultivo de milho solteiro e milho consorciado com braquiária na linha de semeadura, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. Letras maiúsculas comparam os sistemas de cultivo em cada profundidade e letras minúsculas comparam as profundidades em cada sistema de cultivo, a 5% pelo teste t.

Fonte: Adaptada de Calonego et al. (2011).

O SPD resguarda os estoques de matéria orgânica, apresentando maior conteúdo de C e N microbianos até 20 cm de profundidade e mais porosidade visível, além de unidades morfológicas de solo menos compactas e poucas raízes com deformidades, quando se trata de sistemas rotacionados em lugar da simples sucessão soja/trigo (SILVA et al., 2014). O SPD de longa duração confere melhor qualidade física e retenção de água no solo (CALONEGO; BORGHI; CRUSCIOL, 2011; MORAES et al., 2016) e a introdução de forrageiras em consórcio com milho preserva atributos físicos desejáveis, refletidos na macroporosidade, além da fertilidade química, aumentando a produção da soja subsequente (CRUSCIOL et al. 2015; PEREIRA et al., 2016).

Quando não há revolvimento intenso do solo, a atividade microbiana, bem como o C e o N da biomassa são favorecidos (HUNGRIA et al., 2009; BABUJIA et al., 2010; SILVA et al., 2010). A biomassa microbiana, a respiração basal e atividade de determinadas enzimas no solo apresentam estreita relação com os teores de C orgânico e com as produtividades obtidas, de modo que níveis elevados desses indicadores microbiológicos denotam solos de alta qualidade e ambientes mais produtivos (LOPES et al., 2013).

Seguidos os pressupostos de rotação de culturas e manutenção de palhada na superfície, sistemas de manejo com revolvimento mínimo do solo tendem a aumentar a eficiência agrônoma de fertilizantes em regiões tropicais e subtropicais (CRUSCIOL e SORATTO, 2010). A adoção do SPD e a intensificação ecológica permitirão um sistema mais tamponado pela MOS, reduzindo a ação de processos erosivos (proteção pela palhada), minimizando as perdas de nutrientes por erosão, adsorção ou lixiviação e favorecendo sua recirculação por ciclagem, de forma a prover resiliência e estabilidade ao sistema. Por fim, o SPD também proporciona maior eficiência no uso de água, redução de custos, estabilidade produtiva e econômica, com melhoria das condições de vida do produtor.

5. "BAIXA" RESPOSTA À ADUBAÇÃO EM SOLOS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA

A produtividade é o resultado final que integra uma complexidade de respostas a vários indicadores de solo (LOPES et al., 2013) e também a outros componentes ambientais bióticos e abióticos atuantes durante o ciclo das culturas. Logicamente, a produtividade é favorecida nos solos de fertilidade construída, desde que haja equilíbrio entre a disponibilidade de nutrientes e os demais fatores de produção. Conforme o raciocínio desenvolvido nos tópicos anteriores, quanto mais intenso for o caráter de tamponamento e a resiliência desses solos, maiores as chances de combinações diversas de manejo e eventos ambientais conduzirem a produtividades similares, evidenciando a desejável estabilidade de produção.

Nesse sentido, é comum a percepção de baixa resposta ao aumento nas dosagens de fertilizantes em talhões de cultivo comercial bem conduzidos há algum tempo, o que certamente está relacionado aos ganhos em estoques de nutrientes, tamponamento e resiliência nesses ambientes devido ao manejo empreendido. Quando a maior parte dos fatores de produção gerenciáveis é ajustada, o sistema passa a suportar melhor e amenizar eventuais impactos decorrentes de variações na adubação e em fatores ambientais, de modo que, se por um lado tais variações não resultam em incrementos de produtividade, por outro, não há perdas significativas.

Como seria de se esperar, dados experimentais e resultados de observações de produtores sobre correção da acidez e adubação em áreas de fertilidade construída não expressam aquelas nítidas respostas relatadas nos estudos brasileiros clássicos, conduzidos em solos que nunca haviam recebido aplicações de calcário ou de fertilizantes. A análise de trabalhos mais recentes, envolvendo experimentação em áreas que já se encontravam há vários anos em processo produtivo tecnificado e com plantio direto, permite constatar substancial diminuição na magnitude das respostas ao fornecimento de nutrientes (SÁ, 2004; PAULETTI, 2006; WENDLING et al., 2008; RESENDE et al., 2006; SILVA et al., 2006; LANGE; LARA CABEZAS; TRIVELIN, 2008; FONTOURA et al., 2010; RESENDE, 2011; LACERDA et al., 2015), em que doses moderadas de fertilizantes são suficientes para a obtenção de produtividades bastante satisfatórias. Como parte dessa mudança, no SPD tem-se comprovado aumento da eficiência de aproveitamento dos fertilizantes aplicados, em especial dos fosfatos (SOUSA et al., 2013), bem como maior participação de formas orgânicas no total de nutrientes supridos às plantas, atenuando os efeitos que seriam esperados com a adubação.

Assim, pesquisas de adubação em solos de fertilidade construída são, de certa forma, dificultadas por essa baixa magnitude de resposta. Tanto o isolamento de um único fator/nutriente como variável independente, quanto a avaliação do efeito global de um produto multinutriente, podem ter conclusões pouco respaldadas se o planejamento experimental não for criterioso nos contrastes necessários para discriminar as verdadeiras relações de causa e efeito. Visto que esses solos constituem sistemas mais complexos, há maior chance de ocorrência de efeitos confundidos que mascaram os resultados. Baseado somente em medições de produtividade, tratamentos com diferentes produtos ou formas de manejo da adubação tendem a apresentar eficiência técnica equiparável, quando avaliados nesses ambientes cuja fertilidade atual já suplanta a perspectiva de resposta das culturas. Trata-se de pseudoeficiência na realidade, por simples inexistência de diferença devido a qualquer tentativa de modificação no fornecimento de nutrientes. Inclusive, há situações nas quais até mesmo a ausência de adubação não tem efeito sobre a produtividade.

Por essas razões, qualquer estudo de novos produtos ou práticas para o gerenciamento de nutrientes no solo e na planta, em ambientes de fertilidade construída, carece de avaliações em longo prazo. Chuvas bem distribuídas durante a estação de cultivo favorecem o nivelamento das respostas aos tratamentos, ao passo que a ocorrência de déficit hídrico ou outros tipos de estresse costumam acentuar diferenças, evidenciando vantagens e desvantagens do que se está comparando. Resultados conclusivos dependem de acompanhamento da produtividade em pelo menos alguns cultivos sequenciais, além de avaliações mais detalhadas de alterações em atributos do solo, na absorção de nutrientes pelas plantas e nas suas respostas fisiológicas e bioquímicas.

Os dados da Figura 8 exemplificam episódios de baixa resposta a doses de fertilizantes na semeadura e cobertura, em safras consecutivas de soja/milho/soja, em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, numa lavoura comercial sob plantio direto em Unaí, MG. As produtividades foram pouco influenciadas pelas adubações, notadamente nos cultivos de soja, salientando os consideráveis níveis de rendimento obtidos sem a aplicação de fertilizantes. De acordo com a análise econômica representada nas linhas indicando a produtividade líquida, em que foram descontados os gastos relativos à adubação, não houve retorno compensatório na maioria das vezes. O tamponamento do sistema pôde ser claramente comprovado no caso do P, em que, mesmo após a colheita das três safras, o teor de P-Mehlich 1 na análise de solo pouco oscilou no tratamento sem adubação (LACERDA et al., 2015).

Exemplos como o reportado indicam que, quando os níveis de produtividade estão estabilizados em patamares satisfatórios para o produtor, as adubações em solos de fertilidade construída serão mais efetivas se baseadas na filosofia de reposição (CQFS-RS/SC, 2004; FONTOURA et al., 2015), apenas restituindo o que for exportado nas colheitas. Adubações mais pesadas não surtirão efeito no rendimento das culturas, diminuirão a lucratividade e deixarão o sistema predisposto a perdas. Por outro lado, se o objetivo for alcançar metas mais elevadas de produtividade, o aporte de nutrientes precisará ser proporcionalmente maior que a exportação, pois a eficiência de uso pelas plantas diminui quando se buscam novos tetos de rendimento (FONTOURA et al., 2015; RESENDE et al., 2016). Nesse caso, para melhor balizar a tomada de decisão, torna-se importante o acompanhamento econômico dos resultados na lavoura.

De fato, é relativamente comum não haver retorno econômico da adubação em solos com disponibilidade de nutrientes alta ou muito alta, conforme comprovado em relação ao fornecimento de P (VIEIRA et al., 2015) e K (VIEIRA et al., 2016) em áreas de SPD de longa duração com rotação soja, milho, trigo e cevada no centro-sul do Paraná. Esses estudos constataram ainda que, em solos de fertilidade construída, há diferenças entre as culturas quanto à probabilidade de resposta produtiva e econômica à aplicação de fertilizantes. Os cereais de inverno mostraram-se mais exigentes e responsivos ao fornecimento de P e K, o que pode estar ligado à aquisição pelas plantas dificultada por condições de seca e baixas temperaturas que ocorrem durante essa estação de cultivo, afetando, inclusive, a difusão de nutrientes no solo. A cultura da soja foi a menos responsiva nesse sistema de rotação.

6. POSSIBILIDADE E CONVENIÊNCIA DE REVISÃO DOS NÍVEIS CRÍTICOS DE NUTRIENTES EM SISTEMAS DE ALTA PRODUTIVIDADE

Uma questão que emerge quando se discute o manejo visando produtividades mais elevadas é se os níveis críticos de

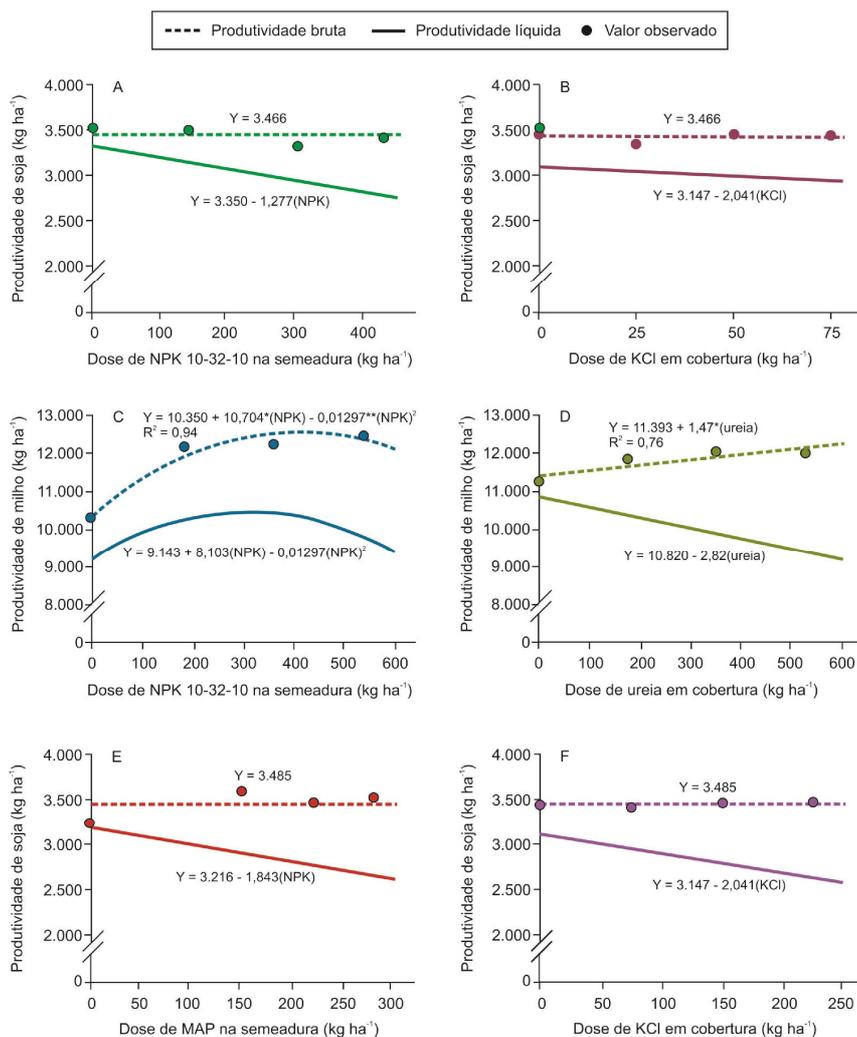


Figura 8. Produtividade bruta e produtividade líquida numa sequência soja/milho/soja em função das doses de fertilizantes utilizadas na semeadura (A, C e E) e na cobertura (B, D e F), em lavoura comercial num Latossolo de fertilidade construída no noroeste de Minas Gerais. Em cada adubação, a terceira dose equivalia ao manejo adotado pelo produtor.

Fonte: Adaptada de Lacerda et al. (2015).

nutrientes no solo indicados na literatura clássica são válidos também para sistemas de alto desempenho produtivo. A rotação de culturas envolve espécies com requerimentos nutricionais distintos e a adubação do sistema deve atender àquelas mais exigentes. Além disso, a maioria das cultivares modernas foi selecionada para alto potencial de produção em ambientes sem limitações de fertilidade. Assim, é razoável supor que os níveis críticos definidos anteriormente pela pesquisa, numa lógica de agricultura diferente da atual (preparo convencional, monocultura, sementes menos produtivas), devam ser revistos para as novas configurações de sistemas de produção, especialmente nas áreas de cultivo de alta intensidade/produtividade.

Há indicativos da necessidade de se identificar novos padrões de fertilidade do solo a serem mantidos nas lavouras, para que a agricultura brasileira possa transpor os atuais níveis de produção e, assim, cumprir a expectativa de sua participação no atendimento à crescente demanda global por alimentos, sem depender majoritariamente da expansão de área cultivada. O caso da soja é emblemático, pois, apesar da sua produtividade potencial exceder 150 sc ha⁻¹, a média na maioria das propriedades

difficilmente ultrapassa 60 sc ha⁻¹. Desde 2008, o Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB) vem incentivando agricultores a desenvolverem um novo modelo de produção que permita atingir, em talhões comerciais, produtividade de 90 sc ha⁻¹.

O Desafio Nacional de Máxima Produtividade, uma ação realizada pelo CESB na forma de concurso, a cada ano tem apresentado aumento no número de áreas superando a meta de 90 sc ha⁻¹. Destacadamente, o incremento na adubação aparece entre as práticas de manejo associadas aos recordes alcançados, o que suscita questionamentos sobre a adequação das tabelas existentes para interpretação da análise de solo e recomendação de fertilizantes quando se almeja alta produtividade dessa cultura (MARTINS, 2016). Além da maior utilização de fertilizantes, as áreas campeãs no desafio CESB frequentemente apresentam níveis de saturação por bases (V%) acima dos normalmente considerados adequados nas tabelas de interpretação de análise de solo. Embora haja aumento nos custos de produção, a forte correlação entre produtividade e lucratividade ($r = 0,99$) nas áreas acompanhadas é um aspecto encorajador para agricultores e técnicos que buscam ganhos de rendimento em suas lavouras.

Estudos mais recentes revelam tendências de aumento nos níveis críticos de nutrientes como P e K, comparativamente aos valores de referência dos manuais de fertilidade do solo. Cubilla et al. (2007) determinaram teor crítico de P pouco maior que o anteriormente proposto, ao realizarem estudo de calibração do nutriente para adubação de culturas de grãos em Argissolos e Latossolos sob SPD no Paraguai. Schlindwein, Bortolon e Gianello (2011) encontraram níveis críticos de K em solos sob SPD no Rio Grande do Sul mais elevados do que os descritos na tabela de interpretação vigente para aquele estado e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004). Em Minas Gerais, Lacerda (2014) determinou níveis críticos de P e K a partir de dados experimentais de dois Latossolos argilosos de cerrado, cultivados com a sucessão soja-milho, obtendo valores superiores às indicações oficiais do estado (ALVAREZ V. et al., 1999). Os trabalhos de pesquisa nessa linha ainda são escassos e o ideal é que se dispusesse de mais resultados nas diversas regiões produtoras, para permitir redefinições mais consistentes possíveis.

No Paraná, a reavaliação dos níveis críticos em solos de basalto levou à atualização nas recomendações regionais para o sistema de sucessão soja/trigo-aveia-cevada-milho safrinha, em solos com mais de 40% de argila. Para teores de P e K na profundidade de 0 a 20 cm, acima de 9 e 120 mg dm⁻³, respectivamente, é possível dispensar a adubação para a soja (EMBRAPA, 2008). Entretanto, considerando o sistema, é preciso lembrar que a cultura da soja é menos sensível ao fornecimento de nutrientes do que os cereais de inverno e o milho (WENDLING et al., 2008; SCHLINDWEIN, BORTOLON, GIANELLO, 2011; FONTOURA et al., 2015; LACERDA et al., 2015), razão pela qual não se deve abrir mão da adubação de manutenção para essas últimas.

O cultivo em solos com disponibilidade alta a muito alta de nutrientes é rotina para grande parte dos agricultores do centro-sul do Paraná, com produtividades médias das culturas de grãos em patamares bem superiores aos observados em outras áreas do País (FONTOURA et al., 2015). Por isso, os resultados de experimentação naquela região agregam informações que podem antecipar expectativas de respostas ao manejo da adubação em outras zonas agrícolas com solos de fertilidade construída. A partir de uma base experimental robusta, envolvendo SPD de longo prazo e diferentes locais, verificou-se que os níveis críticos de P (VIEIRA et al., 2015) e K (VIEIRA et al., 2016), para o sistema de culturas como um todo, foram ligeiramente superiores aos estabelecidos para solos argilosos no estado do Paraná, sendo os teores críticos mais elevados para o grupo de cereais de inverno, que mostraram-se mais exigentes/responsivos à fertilidade (Figura 9). Além disso, as doses indicadas para adubação de reposição em solos de alta ou muito alta disponibilidade foram maiores do que as recomendações pré-existent, porque as produtividades-alvo aumentaram.

Resultados como esses sugerem que as tabelas de interpretação de análise do solo e de recomendação de corretivos e fertilizantes tendem a ficar defasadas à medida que os sistemas de cultivo se intensificam e o potencial de produção aumenta, sendo oportuno aferir os níveis críticos de nutrientes em escala regionalizada. Embora a probabilidade de retorno econômico seja mais baixa nas classes de alta ou muito alta disponibilidade de nutrientes, o dimensionamento da adubação deve garantir o reabastecimento do sistema para continuidade da ciclagem ao longo das rotações, além de repor o exportado nas colheitas (FONTOURA et al., 2015).

Em cultivos de alta performance, a adequada nutrição de cada planta da lavoura é tão importante quanto a ausência de falhas de estande. Plantas deficientes ou com desequilíbrios nutricionais sofrem mais com estresses ou acabam dominadas, comprometendo a produção final. Nesse contexto, é relevante salientar que, diferentemente das parcelas experimentais, que são relativamente homogêneas, os solos de lavouras comerciais sempre apresentam variabilidade espacial da fertilidade. Nesse caso, mesmo que a amostragem seja bem representativa, quando a análise indicar disponibilidade de um nutriente igual ao seu teor crítico, trata-se de uma média, o que implica que há locais amostrados com disponibilidade abaixo, igual ou acima do nível crítico, refletindo a variabilidade espacial. Dito isso, a opção por trabalhar com valores de níveis críticos mais elevados é uma forma de mitigar o problema de micro-sítios de menor fertilidade,

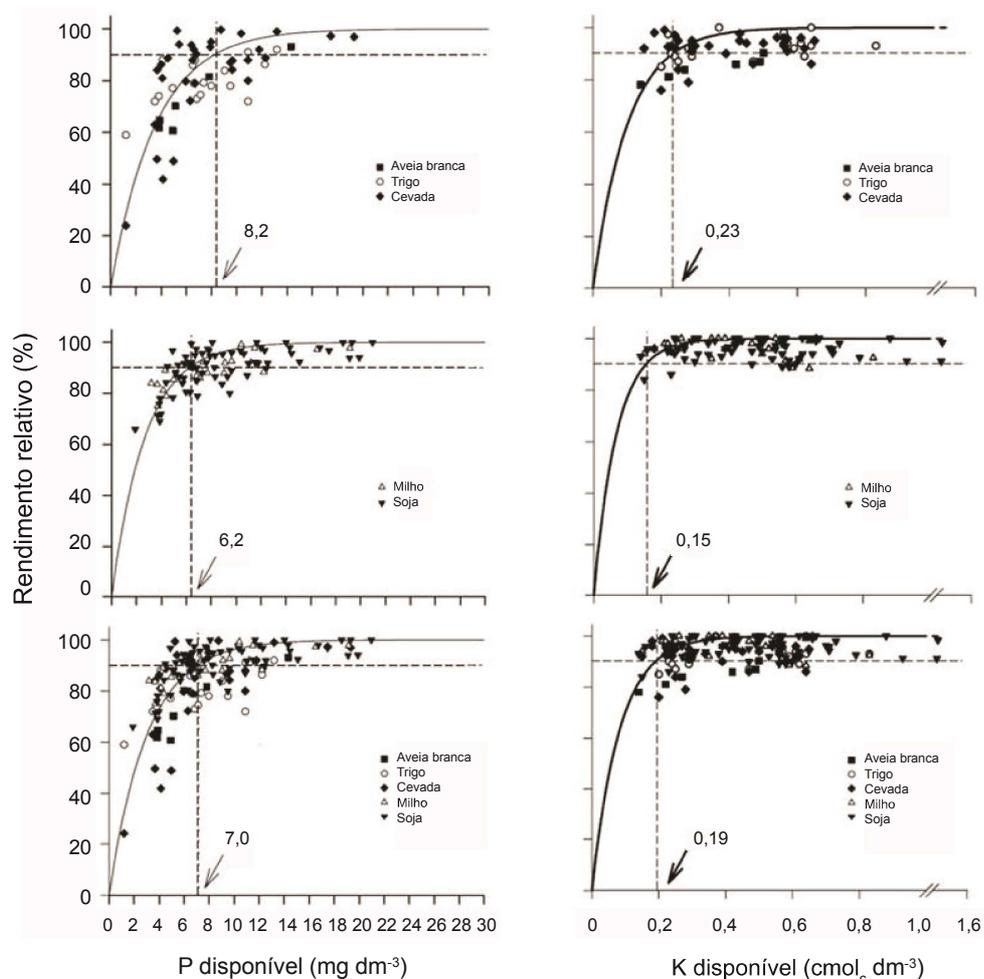


Figura 9. Níveis críticos de fósforo e potássio (Mehlich-1) no solo, na camada de 0 a 20 cm, considerando as culturas de inverno (trigo, cevada e aveia branca), as de verão (soja e milho), e todo o sistema de rotação, na região centro-sul do Paraná.

Fonte: Adaptada de Vieira et al. (2015, 2016).

inerentes ao solo ou derivados das imperfeições de manejo, que prejudicam o desenvolvimento das plantas que ali se estabelecem e ocasionam indesejável desuniformidade no dossel.

7. BALANÇO/EQUILÍBRIO DE NUTRIENTES EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM FERTILIDADE CONSTRUÍDA

Os cultivos em solos de fertilidade construída não estão isentos de desequilíbrios nutricionais, e a manutenção do balanço entre nutrientes constitui um dos principais desafios de manejo, sobretudo em sistemas de produção mais intensivos. Cada espécie vegetal possui padrões peculiares de extração de nutrientes durante o ciclo e de exportação nas partes colhidas. Assim, culturas diversificadas e altas produtividades impõem variações de consumo das reservas do sistema, o que pode acarretar déficits ou sobras de determinados nutrientes. É preciso conhecer e acompanhar as flutuações dessas reservas, pelo confronto de entradas via adubação, saídas pela exportação e correspondentes impactos nos teores disponíveis na análise do solo, para então proceder aos devidos ajustes, restituindo ou utilizando os créditos de nutrientes ao longo do tempo (Figura 4).

O lançamento de cultivares cada vez mais produtivas faz crer que as práticas modais de adubação de lavouras de grãos em dife-

rentes regiões do Brasil sejam insuficientes para sustentar ganhos de produtividade. Sem critério que leve em conta as análises de solo e as estimativas de exportação, o agricultor, ao utilizar os mesmos fertilizantes em doses fixas por longo período, acaba aumentando o risco de desbalanço nos estoques de nutrientes do sistema. Isso faz com que áreas de fertilidade construída fiquem sujeitas a desequilíbrios de suprimento, mediante aplicações super ou subdimensionadas, dependendo do nutriente. Além de restringirem a expressão do potencial genético das cultivares modernas, esses desequilíbrios podem comprometer a rentabilidade das lavouras.

Simulações apontando o balanço deficitário de nutrientes na sucessão soja-milho safrinha foram apresentadas por Oliveira Junior et al. (2013) e Kappes e Zancanaro (2014), ao considerarem práticas de adubação com formulações e dosagens habituais entre produtores do Paraná e do Mato Grosso, respectivamente. A tendência geral é que essas culturas estejam recebendo quantidades insuficientes para repor o N e o K exportados nos grãos. O cenário é bem menos drástico no caso do P, cujo fornecimento costuma superar a exportação, o que explica a existência de muitas áreas com disponibilidade crescente desse nutriente nas análises de solo. Um ponto importante é que, se eventual desbalanço de nutrientes ocorrido num cultivo não for detectado, pode haver prejuízo das culturas subsequentes, comprometendo todo o sistema de produção. É o caso quando se deixa de adubar o milho safrinha e, diante de condições climáticas favoráveis, a colheita farta implica em grande exportação de nutrientes e consumo das reservas do solo, o que poderá afetar a produtividade da própria soja no verão seguinte.

O IPNI oferece acesso a um aplicativo informatizado (<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3293>), com base de dados própria, que permite estimar o balanço de nutrientes na lavoura para uma cultura individual ou um sistema de produção. Essa ferramenta é bastante útil como passo inicial para melhor conhecer a efetividade das adubações empregadas num talhão, bastando que o usuário informe a cultura, a produtividade obtida e as quantidades de nutrientes que foram fornecidas. Automaticamente, o aplicativo retorna os valores do balanço de nutrientes e o índice de desfrute da adubação.

A conveniência de melhor ajuste no fornecimento de N, P e K em lavouras comerciais de alto investimento tecnológico foi demonstrada por Hickmann (2014) e Lacerda et al. (2015) em experimentos, respectivamente, nas regiões Campos das Vertentes e Noroeste de Minas Gerais. Variando quantidades a menos e a mais, em comparação à adubação de rotina das fazendas para as culturas de soja e milho, durante três anos, esses trabalhos comprovaram que o manejo que vinha sendo utilizado pelos produtores não era o que proporcionava maior eficiência técnica e econômica (Tabela 4, Figura 8). Nos dois estudos de caso, foram evidenciadas oportunidades para adequação dos níveis de N, P e K nas adubações, promovendo ganhos de rentabilidade e uso mais eficiente de fertilizantes. Ao considerar o manejo para o sistema, Hickmann (2014) verificou que certo aumento de N e K e concomitante redução na quantidade de P proporcionaram vantagens em produtividade, receita e eficiência no uso desses nutrientes (Tabela 4). Ausência de resposta da soja e discreto incremento de produtividade para o milho (Figura 8) foram reportados por Lacerda et al. (2015), fazendo com que o diferencial de receita não fosse suficiente para

Tabela 4. Resposta cumulativa ao fornecimento de N, P e K, rentabilidade e eficiência de uso de nutrientes (EUN), na sequência milho/soja/milho em lavoura comercial cultivada em Latossolo de fertilidade construída na região dos Campos das Vertentes, MG.

Nutrientes aplicados			Produtividade acumulada	Lucro	EUN ¹			
N	P ₂ O ₅	K ₂ O			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Média
----- (kg ha ⁻¹) -----				(R\$ ha ⁻¹)	----- (kg kg ⁻¹) -----			
0	0	0	17.496	3.670,60	-	-	-	-
129	0	117	21.249	4.410,96	29	-	32	31
258	0	234	25.239	5.517,44	30	-	33	32
387	0	351	24.822	4.742,80	19	-	21	20
56	189	43	19.798	3.998,17	41	12	54	36
185	189	160	23.451	4.969,17	32	32	37	34
314	189	277	26.628	5.599,49	29	48	33	37
443	189	394	28.400	5.884,73	25	58	28	37
102	330	71	22.548	4.471,87	50	15	71	45
231	330	188	24.471	4.668,59	30	21	37	29
360	330	305	26.932	5.148,51	26	29	31	29
489	330	422	28.733	5.394,35	23	34	27	28
150	493	106	22.165	3.767,69	31	9	44	28
279	493	223	26.130	4.796,85	31	18	39	29
408	493	340	27.824	5.042,05	25	21	30	25
537	493	457	29.569	5.185,93	22	24	26	24

¹ EUN = [(produtividade com o nutriente – produtividade sem o nutriente) / quantidade do nutriente aplicada].

O tratamento assinalado em branco foi o que apresentou maiores rentabilidade e eficiência média no uso de nutrientes em comparação ao manejo do produtor, correspondente ao tratamento assinalado em verde.

Fonte: Adaptada de Hickmann (2014).

compensar os custos da adubação nas condições daquela lavoura durante as três safras avaliadas.

Aprimoramentos no contexto dos exemplos citados são possíveis mediante algum investimento de tempo e recursos para monitoramento das condições de fertilidade do solo e do comportamento produtivo das culturas. Deve-se ponderar também as informações de aportes via fertilizantes e de exportação de nutrientes nas colheitas, para nortear a tomada de decisão sobre eventuais modificações na adubação (Figura 4). Obviamente, trata-se de avanços a serem buscados em âmbito local, uma vez que cada lavoura representa um ambiente de produção peculiar, com histórico e reações próprias quanto ao uso e manejo do solo.

É importante frisar que os solos arenosos são mais propensos a desarranjos nas proporções ideais entre nutrientes devido à sua menor capacidade de reserva e tamponamento, essencialmente dependentes do conteúdo de MOS. Mesmo com o SPD, é difícil manter a disponibilidade acima do nível crítico para todos os nutrientes nesses solos, tornando desafiador o planejamento para adubações equilibradas e com mínimas perdas. No caso, o parcelamento, com doses menores e mais frequentes, constitui a decisão mais acertada para nutrientes como N, K, S e B, que podem ser mais facilmente perdidos da zona de exploração radicular.

A análise dos teores de nutrientes nos produtos colhidos na propriedade é aconselhável para aqueles que buscam estratégias mais avançadas de gerenciamento da fertilidade, pois os dados de exportação indicados na literatura não são convergentes, variando em função de anos, locais e cultivares avaliados (Tabela 5 e Tabela 6). Mesmo quando atualizados, esses valores tabelados são apenas uma referência, que pode não atender aos requisitos para ajustes finos ou agricultura de precisão na adubação em solos de fertilidade construída.

8. SOLOS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA COMO AMBIENTE PROPÍCIO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA ADUBAÇÃO DE SISTEMA

A diversificação de cultivos para a intensificação do uso da terra é hoje uma necessidade, tanto do ponto de vista econômico, para reduzir riscos e ampliar a lucratividade dos empreendimentos agrícolas, quanto sob a ótica de sustentabilidade do agroecossistema, que é prejudicada quando há simplificação tendendo à monocultura (KAPPES, 2015). Geralmente, os sistemas mais diversificados trazem dúvidas sobre a melhor forma de manejo da fertilidade, se a adubação deve focar o requerimento individual ou global das espécies envolvidas, e ainda sobre os momentos mais apropriados para aplicação dos fertilizantes.

Na filosofia da adubação de sistema, busca-se planejar as operações para abastecer o solo de nutrientes de modo a satisfazer a absorção pelas plantas no decorrer de um ano agrícola ou de um ciclo

Tabela 6. Extração e exportação de nutrientes por cultivar de soja com tipo de crescimento indeterminado, em equivalentes de N, P₂O₅ e K₂O.

Parte da planta	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- (kg t ⁻¹ de grãos) -----			
Grãos (exportação)	65,0 (51,0)*	13,3 (10,0)	24,0 (20,0)
Restos culturais	17,0 (32,0)	3,4 (5,4)	16,8 (18,0)
Total (extração)	82,0 (83,0)	16,7 (15,4)	40,8 (38,0)

* Dados entre parêntesis constituem os valores de referência anteriores para a cultura no Brasil (EMBRAPA, 2013).

Fonte: Adaptada de Oliveira Junior et al. (2014).

de rotação, ao invés de adubar cada cultura com base nas demandas individuais. Devidamente implementada, essa abordagem permite conciliar facilidades operacionais e uso eficiente de fertilizantes.

Solos de fertilidade construída, cultivados por longo tempo em modelos conservacionistas como o SPD, e sem limitações de ordem física, viabilizam a aplicação prática da adubação de sistema. O grande aporte de resíduos, associado à alta atividade biológica e bioquímica, garantem eficiente ciclagem e suprimento contínuo de nutrientes, em sincronia com a demanda das culturas. Desse modo, praticamente toda a adubação de reposição pode ser aplicada anualmente de uma única vez, antecedendo o estabelecimento da espécie mais exigente ou que apresente maior resposta (FONTOURA et al., 2015). Todavia, essa estratégia é ainda pouco explorada pelos agricultores brasileiros.

Os ambientes mais tamponados e com bons estoques de nutrientes possibilitam flexibilizar as práticas de fornecimento de acordo com as conveniências operacionais, sem grandes prejuízos às culturas. Para adubar o sistema, deve-se levar em conta as particularidades das combinações de espécies utilizadas em diferentes regiões ou mesmo propriedades, ponderando as exigências e os níveis de exportação de cada nutriente, para então estipular a melhor estratégia de manejo.

Se planejada com critério, a adubação de sistema permite usufruir o potencial produtivo de todo o conjunto de culturas que compõe a sucessão ou rotação, tirando vantagem das circunstâncias oportunas para melhor aproveitamento dos fertilizantes (Tabela 7). Sempre que possível, é conveniente direcionar a aplicação de fertilizantes para o cultivo daquelas espécies mais exigentes ou que apresentem maior retorno econômico ao fornecimento de nutrientes. Com as tecnologias atualmente disponíveis, também se pode acomodar a distribuição do adubo conforme as épocas mais propícias à circulação do maquinário, com menor conflito de programação com outras atividades, mormente nas janelas de semeadura, o que amplia o rendimento operacional nas fazendas.

Tabela 5. Valores de exportação de nutrientes pelo milho, em equivalentes de N, P₂O₅ e K₂O, de acordo com diferentes fontes de consulta.

Exportação			Observações	Referência
N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
----- (kg t ⁻¹ grãos) -----				
17,0 a 23,0	9,2 a 13,7	4,8 a 8,4	Faixas de valores levantados na literatura brasileira	Sousa e Lobato (2004)
15,0	5,5	8,4	Valores médios para o Brasil	Fancelli e Tsumanuma (2007)
–	6,2	3,8	Médias de 679 amostras de grãos analisadas na Embrapa Soja	Oliveira Junior et al. (2010)
15,7	7,1	4,4	Valores médios em trabalhos brasileiros publicados a partir de 1995	Resende et al. (2012)

Tabela 7. Indicações de adubação de sistema com P e K para combinações de culturas em rotação sob SPD em solos argilosos da região Centro-Sul do Paraná.

Classe de disponibilidade	Teor no solo*	Sequência de cultivos**							
		Trigo/Cevada	Espécie de cobertura	Soja	Milho	Trigo/Cevada	Espécie de cobertura	Soja	Milho
	P (mg dm ⁻³)	----- P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) -----							
Alta	8 - 16	(RI + RS) + 20%	15	–	RM	(RI + RS) + 20%	15	–	RM
Muito alta	> 16	RI + RS	–	–	RM	RI + RS	–	–	RM
	K (mg dm ⁻³)	----- K ₂ O (kg ha ⁻¹) -----							
Alta	90 - 180	RI + RS	–	–	RM	RI + RS	–	–	RM
Muito alta	> 180	RI + RS	–	–	RM	RI + RS	–	–	RM

* Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich 1.

** Rotação soja ou milho no verão antecedidos, respectivamente, por trigo/cevada ou espécies de cobertura no inverno.

RI = reposição da exportação de nutrientes pelas culturas de inverno, equivalente a 10 kg P₂O₅ e 6 kg K₂O por tonelada de grãos de trigo/cevada. RS = reposição da exportação de nutrientes pela soja, equivalente a 14 kg P₂O₅ e 20 kg K₂O por tonelada de grãos. RM = reposição da exportação de nutrientes pelo milho, equivalente a 8 kg P₂O₅ e 6 kg K₂O por tonelada de grãos.

Fonte: Adaptada de Fontoura et al. (2015).

O exemplo de adubação de sistema apresentado na Tabela 7 foi ajustado para o esquema de rotação predominante no Centro-Sul do Paraná, em SPD de longa duração. Em solos com disponibilidade alta ou muito alta de P e K, recomenda-se que os fertilizantes sejam aplicados basicamente para repor as quantidades exportadas com as colheitas. Quando o cultivo de verão for soja, sugere-se que a demanda anual de adubação do sistema seja aplicada integralmente no cultivo de inverno com trigo ou cevada, visto que esses cereais são mais responsivos do que a leguminosa em solos de fertilidade construída. Quando o cultivo de verão for milho, mantém-se a aplicação da adubação de reposição nesta cultura, devido ao seu maior requerimento nutricional para altas produtividades (FONTOURA et al., 2015; VIEIRA et al., 2015, 2016).

Um ponto importante é conhecer bem as condições do talhão, por meio do monitoramento periódico da fertilidade no perfil, juntamente com as características fisiológicas de cada espécie vegetal envolvida. Esse conhecimento é que dará segurança na escolha do momento e modo de fornecimento dos nutrientes.

No caso de nutrientes como N e K, que podem ser perdidos com mais facilidade, as antecipações de aplicação das quantidades demandadas pelo sistema não são plausíveis para qualquer condição de solo, clima e cultura. Também não é prudente fixar e extrapolar recomendações em relação à distribuição de fertilizantes a lanço ou no sulco de semeadura. Principalmente em se tratando do P, alguma alternância entre essas modalidades é recomendável na adubação de sistema em solos argilosos, com o objetivo de manter ambientes de alto potencial produtivo em plantio direto, uma vez que produtividades mais elevadas estão associadas a maiores teores do nutriente em profundidade até 20 cm (OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; FONTOURA et al., 2015; ZANCANARO et al., 2015a). Outra possibilidade no gerenciamento do sistema é adubar no sulco daquelas culturas com menor espaçamento entre linhas, para diluir o efeito salino de fertilizantes próximos às sementes ou quando há interesse em incorporar nutrientes de forma mais homogênea na lavoura.

9. OPORTUNIDADES PARA OTIMIZAÇÃO DO MANEJO VISANDO MAIOR EFICIÊNCIA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO E MAIOR RENTABILIDADE

O gerenciamento do fornecimento de nutrientes é um componente do processo de produção que pode impactar subs-

tancialmente a rentabilidade das lavouras, mas boa parte dos produtores e técnicos não tem uma dimensão mais exata de quanto seriam as dosagens de adubos mais apropriadas aos diferentes ambientes de cultivo ao longo do tempo. Duas situações ainda são comuns nas regiões agrícolas do País: a primeira diz respeito àqueles que acham que simplesmente aumentar as doses dos fertilizantes que se está acostumado a usar é garantia de colheitas crescentes, enquanto a segunda refere-se aos que se acomodaram e usam sempre a mesma adubação, apesar de investirem em sementes e tratamentos culturais mais modernos, que geram novos patamares de produtividade. As adubações realizadas sem o acompanhamento da fertilidade do solo por meio de análises periódicas acabam por diminuir a lucratividade das lavouras, em razão do consumo inadequado de fertilizantes (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2010). Assim, para muitos, parece não ser claro o papel de uma adubação mais eficiente para a competitividade no setor agrícola.

Talhões com elevados teores de nutrientes representam uma reserva que pode ser manipulada em prol de melhores ajustes técnicos e econômicos, com benefícios que conciliam maior receita líquida, uso mais eficiente de fertilizantes e redução de riscos ao ambiente. O solo de fertilidade construída constitui uma poupança que precisa ser gerenciada, recebendo aplicações e retiradas, na forma e momentos mais convenientes ao sistema de produção e ao agricultor. Há situações em que é possível estabelecer uma estratégia variável na aquisição de fertilizantes, utilizando-se das reservas do solo nos momentos de alta de custo dos adubos ou baixo preço de venda dos grãos e recompondo-as quando as cotações forem mais favoráveis. Lavouras com fertilidade construída, em solos de textura média a argilosa sob SPD, podem, durante algum tempo, manter os mesmos patamares de produtividade e maior retorno econômico utilizando menores quantidades de fertilizantes do que seria a adubação habitual (Figura 8).

Uma constatação comum é a proporção entre nutrientes na adubação não ser condizente com a relação ótima para o atendimento da demanda do sistema de culturas, o que pode limitar a produtividade levando à perda de rentabilidade (Tabela 4). Há casos em que o ajuste na aplicação de um único nutriente pode aumentar o retorno do investimento em outras tecnologias (sementes, defensivos, máquinas, irrigação). Entre os macronutrientes primários, a

tendência é que N e K sejam proporcionalmente mais demandados na adubação do que o P, à medida que aumenta a produtividade do sistema. Daí a conveniência de ajustar o fornecimento de cada nutriente de forma individualizada, o que não é possível quando se trabalha apenas com fórmulas pré-definidas.

É oportuno promover redimensionamentos dinâmicos no tempo, a partir de monitoramento mais frequente por meio de análises de solo, do acompanhamento do histórico de produtividade e da estimativa das taxas de exportação dos diversos nutrientes (Figura 4). Essa estratégia, relativamente simples e que pode ser incorporada à rotina das fazendas, é decisiva na busca de eficiência de gestão para maior competitividade. A Figura 10 sintetiza as principais vias de informação e critérios a considerar, aditivamente, quando se busca ajustes mais refinados no manejo da adubação. Todos os itens devem ser tratados pelo profissional de assistência técnica ou tomador de decisão à luz das características peculiares aos solos de fertilidade construída discutidas no presente artigo, levando em conta que alguns dos critérios são dependentes do manejo precedente e do histórico de culturas e, portanto, podem ser definidos de forma particularizada por talhão.

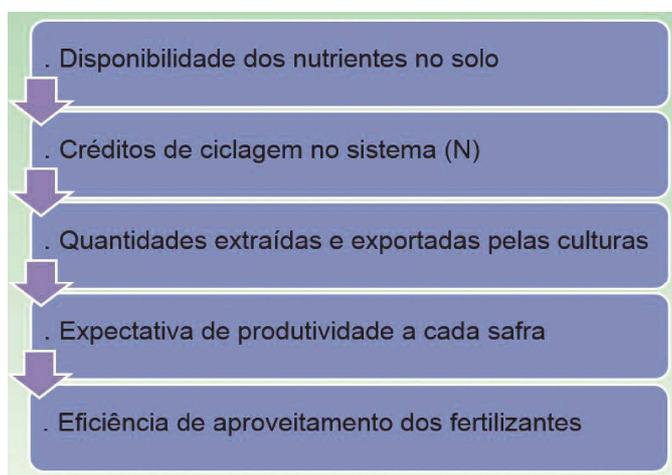


Figura 10. Informações necessárias para se refinar o dimensionamento da adubação em solos de fertilidade construída.

Crédito: Álvaro Resende.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos de fertilidade construída correspondem ao cenário emergente nas áreas agrícolas bem manejadas e trazem novos quesitos a serem considerados na busca por ganhos de eficiência na adubação. Modificações nos estoques e na dinâmica de nutrientes nesses solos interferem na resposta das culturas à sua aplicação e surgem oportunidades para novas estratégias de gerenciamento da fertilidade, focadas em otimização do uso de fertilizantes e da rentabilidade para o agricultor. Os seguintes aspectos devem ser enfatizados:

- Os indicadores diretos da condição de fertilidade construída dizem respeito à detecção de teores dos principais nutrientes acima dos níveis críticos na análise do solo, enquadrados nas classes de disponibilidade alta a muito alta.
- O controle da acidez, as adubações corretivas e de manutenção, associadas a práticas que privilegiem a presença de matéria orgânica são necessárias à construção da fertilidade. Entretanto, a manutenção de ambientes de alto potencial produtivo depende também de cuidados para que se tenham condições físicas e biológicas do solo favoráveis ao desempenho ótimo das culturas.

- A intensificação ecológica com inclusão de mais espécies em rotação, sucessão ou consórcio, atrelada ao plantio direto, são requisitos para assegurar o tamponamento da fertilidade do solo após as adequações químicas e aumentar a resiliência do sistema, resultando em maior estabilidade de produção frente a situações de estresses. Manter ou, preferencialmente, aumentar o conteúdo de matéria orgânica deve ser o objetivo central, pois esse constituinte influencia numerosos processos no solo, com papel fundamental na qualidade química, física e biológica.

- Alcançada a conjuntura acima, os solos de fertilidade construída passam a expressar as condições para obtenção de elevadas taxas de aproveitamento dos nutrientes, com índices de eficiência de uso de fertilizantes superiores aos convencionados na literatura clássica.

- O aperfeiçoamento do manejo de solos de fertilidade construída requer certo investimento na obtenção de informações sobre o comportamento de cada ambiente de produção (Figura 10). A resposta das culturas à adubação nesses solos é menos expressiva do que a observada em áreas recém-abertas para a agricultura, muitas vezes sem ganhos perceptíveis em curto prazo. Nesses casos, doses relativamente modestas de fertilizantes, apenas para repor as quantidades de nutrientes exportadas nas colheitas, são suficientes para manter os níveis normais de produtividade.

- Quando se busca atingir novos tetos produtivos em solos de fertilidade construída, explorando o potencial genético de cultivares modernas, é preciso proceder a ajustes no dimensionamento das adubações, compatibilizando com as exigências nutricionais para altas produtividades. Estudos recentes sugerem a necessidade de confirmação e eventual elevação dos níveis críticos de nutrientes em tabelas de referência regionalizadas, para interpretação de análise do solo de ambientes favoráveis a lavouras de alto rendimento, visando aprimoramentos no diagnóstico e na tomada de decisão de manejo da adubação.

- Os solos de fertilidade construída em SPD constituem ambientes ideais para o exercício da adubação de sistema, nos quais se pode trabalhar com mais flexibilidade para acomodar a aplicação de fertilizantes conforme conveniências operacionais e de exploração do potencial produtivo das culturas envolvidas.

- O equilíbrio nutricional é um ponto crítico no manejo desses solos, pois há constante flutuação dos estoques de nutrientes no sistema, de acordo com as entradas via adubação e saídas via exportação nas colheitas. Dependendo do nutriente, do tipo de solo, da exigência decorrente da combinação de culturas e das produtividades obtidas, podem ocorrer desbalanços que prejudicam o desempenho final do sistema. Tem sido comum constatar sobras de determinados nutrientes e déficits de outros no sistema, resultantes do padrão de adubação praticado em diferentes regiões agrícolas. O cálculo do balanço dos principais nutrientes no sistema de produção é simples e, ao evidenciar alternativas para melhor equilíbrio na adubação, pode propiciar impactos positivos em relação ao aproveitamento de recursos (água), eficiência de uso de fertilizantes, produtividade e lucratividade ao produtor, além de menores riscos ao ambiente.

AGRADECIMENTOS: À Fapemig, ao CNPq e à Fundação Agrisus.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a. aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Plantas de cobertura e qualidade física do solo. In: SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. (Ed.). **Plantas de cobertura dos solos do Cerrado**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p. 163-180, 2010.
- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, p. 2174-2181, 2010.
- BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Nutrientes**. 1.ed. Piracicaba: IPNI Brasil, 2010, v. 2. p. 133-204.
- BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, p. 784-795, 2010.
- BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; NASCENTE, A. S.; MARTINS, P. O. Intercropping time of corn and palisadegrass or guineagrass affecting grain yield and forage production. **Crop Science**, v. 53, p. 629-636, 2013.
- BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O.; CAMARGO, F. P.; BORGHI, E. Obtenção de altas produtividades em sistemas agrícolas. **Fronteira Agrícola**, n. 12, p. 1-3, 2016.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; TIVET, F.; FERREIRA, A. O.; FRANCHINI, J. C.; SCHIMIGUEL, R.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z. Can highly weathered soils under conservation agriculture be C saturated? **Catena**, v. 147, p. 638-649, 2016.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, n. 141, p. 1-13, 2013.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.
- CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2183-2190, 2011.
- CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 45-63.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 769-850.
- CQFS-RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: SBCS: NRS/UFRGS, 2004. 400 p.
- CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; NETO, M. S.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, v. 6, n. 21450, 2016. 8 p.
- COSTA, S. E. V. G.; SOUZA, E. D. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; CAO, E. G.; HOLZSCHUH, M. J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1237-1247, 2009.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P. Sistemas de produção e eficiência agrônoma de fertilizantes. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto atual e práticas de suporte**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2010. v. 1, p. 228-275.
- CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; BORGHI, E.; MATEUS, G. P. Benefits of integrating crops and tropical pastures as systems of production. **Better Crops**, v. 94, n. 2, p. 14-16, 2010.
- CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; MIELNICZUK, J. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1463-1474, 2007.
- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: Região central do Brasil 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 261 p. (Embrapa Soja. Sistema de Produção, 13).
- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: Região central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p. (Embrapa Soja. Sistema de Produção, 16).
- FANCELLI, A. L.; TSUMANUMA, G. M. Nitrogênio e enxofre nas culturas de milho e feijão. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. p. 445-486.
- FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1907-1914, 2010.
- FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; VIERO, F.; ANGHINONI, I.; MORAES, R. P. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146 p.
- GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, p. 283-290, 2003.
- GIANELLO, C.; WIETHÖLTER, S. Novo sistema de adubação para as culturas de grãos nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004, Florianópolis. **Resumos expandidos...** Florianópolis: SBCS-NRS, 2004. (CD-Rom).
- HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma seqüência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais**. 2014. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, p. 288-296, 2009.
- INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016.
- KAPPES, C. Inserção do milho safrinha em sistemas de produção no Mato Grosso. In: Fundação Mato Grosso (Ed.). **Boletim de Pesquisa 2015/2016**. Santa Cruz do Sul, RS: Editora Gazeta, 2015. p. 136-173.
- KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 30., 2014, Salvador. Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global. **Palestras...** Sete Lagoas: ABMS, 2014. p. 358-381.
- LACERDA, J. J. J. **Aferição da adubação NPK e de níveis críticos para o sistema soja-milho de fertilidade construída**. 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- LACERDA, J. J. J.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 769-778, 2015.
- LANGE, A.; LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Recuperação do nitrogênio das fontes sulfato e nitrato de amônio pelo milho em sistema semeadura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 123-130, 2008.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v.137, p.1-72. 2016.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, n. 32, p. 29-57, 2012.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 461-472, 2013.
- MARTINS, O. C. Aumentar o patamar de produtividade na cultura da soja: o desafio do CESP. In: MOREIRA, F. M. S.; KASUYA, M. C. M. (Ed.). **Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologia para todos**. Lavras: SBCS, 2016. p. 525-540.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

- NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 877-888, 2011.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. Manejo da adubação fosfatada em solos de Cerrado: Qual é o custo agrônomico da operacionalidade da aplicação a lanço? In: WORKSHOP CTC AGRICULTURA, 12., 2013, Rio Verde. **Resultados 2013...** Rio Verde: Centro Tecnológico COMIGO, 2013. p. 21-26.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. Soja. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**: Culturas. Piracicaba: IPNI, 2010. v. 3, p. 1-38.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; FOLONI, J. S. S. Marcha de absorção e acúmulo de macronutrientes em soja com tipo de crescimento indeterminado. In: OLIVEIRA JUNIOR, A.; LEITE, M. R. V. B. C.; CASTRO, C. (Ed.). **REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA**, 34., 2014. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa, 2014. p.133-136.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agrônomicas**, n. 143, p. 1-10, 2013.
- PAULETTI, V. **Rendimento de soja, milho e feijão com estratégias de aplicação de adubo mineral, no sistema plantio direto**. 2006. 79 p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- PEREIRA, F. C. B. L.; MELLO, L. M. M.; PARIZ, C. M.; MENDONÇA, V. Z.; YANO, E. H.; MIRANDA, E. E. V.; CRUSCIOL, C. A. C. Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40:e0150003, 2016. 20 p.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.
- RAIJ, B. van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: ANDA, 1988. 88 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. 285 p.
- RESENDE, A. V. **O sistema plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 23 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 118).
- RESENDE, A. V. Reflexões sobre adubação fosfatada a taxa variável. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 20, p. 15-18, 2011.
- RESENDE, A. V.; COELHO, A. M. C.; SANTOS, F. C.; LACERDA, J. J. J. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Sete Lagoas: Embrapa, 2012. 12p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 181).
- RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURTI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 453-466, 2006.
- RESENDE, A. V.; LACERDA, J. J. J.; HICKMAN, C.; WILDA, L. R. M.; FURTINI NETO, A. E.; SILVA, C. A.; MOREIRA, S. G. Pensando a adubação NPK em sistemas de alta produtividade de grãos. In: MOREIRA F. M. S.; KASUYA, M. C. M. (Ed.). **Fertilidade e biologia do solo**: integração e tecnologia para todos. Lavras: SBCS, 2016. p. 541-558.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359 p.
- SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 201-222.
- SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 104, p. 56-64, 2009.
- SÁ, J. C. M.; SÁ, M. F. M.; SANTOS, J. B.; OLIVEIRA, A. Dinâmica da matéria orgânica nos Campos Gerais. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 443-461.
- SÁ, J. C. M.; SEGUY, L.; SÁ, M. F. M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**: Culturas. 1. ed. Piracicaba: IPNI, 2010, v. 1, p. 383-420.
- SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKIEI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; HARTMAN, D. C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, p. 531-543, 2015.
- SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1669-1677, 2011.
- SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 541-547, 1994.
- SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 119, p. 20-26, 2010.
- SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZZETTI, S.; VELOSO, M. E. C.; TRIVELIN, P. C. O. Absorção de nitrogênio nativo do solo pelo milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.723-732, 2006.
- SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; RALISCH, R.; HUNGRIA, M.; GUIMARÃES, M. F. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil & Tillage Research**, v. 142, p. 42-53, 2014.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso do gesso agrícola nos solos do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 19 p.
- SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; NUNES, R. S. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto no cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2013. 20 p. Disponível em: <http://www.agrisus.org.br/arquivos/artigo_embraapa_cerrados.pdf>. Acesso em 20 nov. 2016.
- URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; MARTINS, M. R.; BODDEY, R. M. A cultura de milho e seu impacto nas emissões de GEE no Brasil. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. (Ed.). **CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**, 30., Salvador, 2014. Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 61-71.
- VEZZANI, F. M.; CONCEIÇÃO, P. C.; MELLO, N. A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 483-493.
- VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, R. P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 794-808, 2015.
- VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, R. P.; CARNIEL, E. Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the Central-Southern region of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150193, 16 p., 2016.
- WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1929-1939, 2008.
- WILDA, L. R. M.; RESENDE, A. V.; CUNHA, T. F.; LACERDA, J. J. J.; LIMA, G. J. O. Condições de acidez subsuperficial de solos cultivados para a produção de grãos no Cerrado do Brasil Central. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 30., 2012, Maceió. **FertBio 2012: A responsabilidade socioambiental da pesquisa agrícola**. **Anais...** Maceió: SBCS/UFAL. 2012. 4 p. (CD-Rom).
- ZANCANARO, L.; KAPPES, C.; VALENDORFF, J. D. P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A. Manejo do solo: adubação e nutrição na cultura da soja. In: FUNDAÇÃO MATO GROSSO (Ed.). **Boletim de Pesquisa 2015/2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2015b. p. 54-95.
- ZANCANARO, L.; KAPPES, C.; ONO, F. B.; VALENDORFF, J. D. P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A.; SEMLER, T. D. Adubação fosfatada no sulco de semeadura e em superfície. In: FUNDAÇÃO MATO GROSSO (Ed.). **Boletim de Pesquisa 2015/2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2015a. p. 96-113.
- ZOTARELLI, L.; ZATORREA, N. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. S.; JANTALIA, C. P.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, B. J. R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, v. 132, p. 185-195, 2012.